

Fig. 5: Punti di monitoraggio del carrello.

Fig. 6: Connessioni sistemi per il monitoraggio delle condizioni del carrello.

tra cui i dispositivi di frenatura e quelli di monitoraggio delle condizioni. Le unità sensorizzate SKF Axletronic sono parte integrante dei dispositivi di monitoraggio delle ferrovie.

Monitoraggio delle condizioni dei carrelli

Il sistema SKF Multilog per il monitoraggio a bordo treno delle condizioni delle boccole, l'IMx-R, può far parte del sistema di monitorag-

gio dei carrelli oppure essere un dispositivo autonomo (figg. 5 e 6). Esso soddisfa i requisiti dell'European Technical Specification for Interoperability (TSI), Direttiva 96/48 EC.

La TSI impone che le apparecchiature siano in grado di rilevare un eventuale peggioramento delle condizioni del cuscinetto di una boccola, controllandone la temperatura e/o le frequenze di vibrazione. Il sistema dovrà segnalare

la necessità di una manutenzione e indicare le eventuali limitazioni di operatività, a seconda dell'entità del guasto. Il sistema di rilevamento opera autonomamente a bordo del treno e invia il risultato dei rilevamenti al conduttore. Il sistema è conforme alla norma EN 15437-2.

Le soluzioni SKF

Da oltre 100 anni, la SKF è sinonimo di tecnologia avanzata e di profonda conoscenza nel settore dei cuscinetti, di cui è il principale fornitore all'industria ferroviaria. Non solo, la SKF è anche un importante fornitore di prodotti e soluzioni nel settore della mecatronica, dei sistemi di lubrificazione, delle tenute e dei servizi per vari tipi di applicazione (fig. 1).

Per quanto riguarda l'industria ferroviaria, l'assortimento SKF comprende e comprenderà in futuro unità cuscinetto con i relativi sistemi di tenuta per le boccole e boccole speciali, oltre a soluzioni di tipo mecatronico per misurare i parametri operativi e monitorare le condizioni dei carrelli. I sistemi di lubrificazione comprendono dispositivi per la riduzione dell'attrito e dell'usura tra ruote e rotaia. I pacchetti di servizi sono configurati in funzione delle necessità di operatori e costruttori e comprendono test, montaggio, attività e servizi post-vendita, ricostruzioni e servizi logistici. La SKF dispone di un'esclusiva rete internazionale di vendita, applicazione e servizio, con ingegneri che lavorano in collaborazione con costruttori e operatori su progetti internazionali.

Conclusioni

In passato il lavoro di sviluppo si è concentrato prevalentemente sulla progettazione e il continuo perfezionamento di cuscinetti idonei

alle singole applicazioni. Oggi si dotano i cuscinetti e le unità cuscinetto delle boccole con i sensori SKF Axletronic, che forniscono segnali atti ad essere utilizzati dai sistemi di monitoraggio delle condizioni dei carrelli. In futuro la mecatronica sarà una componente standard di soluzioni che offrono nuove opportunità di aumentare l'affidabilità e la sicurezza e di ridurre i costi di manutenzione del materiale rotabile. Tutte le soluzioni sono descritte in un manuale completo, contenente informazioni particolareggiate su boccole, cuscinetti, sensori, monitoraggio delle condizioni e servizi. ●

Gottfried Kuře, Marketing Director, Railway Business Unit, SKF, Austria

SINTESI

Ponendo l'accento sull'affidabilità e sulla sicurezza, i costruttori e gli operatori di materiale rotabile ricercano soluzioni che soddisfino le sfide attuali e future. Il futuro dello sviluppo delle boccole ferroviarie deve certamente passare attraverso un gran numero di prove pratiche e di laboratorio. La SKF soddisfa i requisiti dell'industria grazie alle conoscenze approfondite in materia e all'offerta di pacchetti di soluzioni riguardanti gruppi ruota, boccole, monitoraggio delle condizioni, sensori, lubrificazione e servizi di ingegneria, ricostruzione e addestramento del personale.

Un nuovo modello per il coefficiente di carico statico dei cuscinetti temprati a induzione

La SKF è alla costante ricerca di una migliore comprensione dell'influenza dei trattamenti termici sulle prestazioni dei cuscinetti. In un recente studio i suoi ingegneri si propongono di valutare meglio l'importanza dello spessore di tempra sulla capacità di carico dei cuscinetti stessi.

LE RALLE DI GRANDI dimensioni sono di solito temprate in superficie tramite il riscaldamento a induzione. Affinché la capacità di carico di questi cuscinetti sia idonea per una data applicazione, la profondità raggiunta dalla tempra (case depth, CD) deve avere un valore ottimale. Per quanto riguarda i cuscinetti con tempra a cuore, i calcoli dei coefficienti di carico statico e dinamico sono ormai universalmente accettati e inseriti nelle norme ISO 76 e 281. In prima istanza, venne stabilito il carico statico applicato su un cuscinetto non rotante in grado di provocare una deformazione permanente sulle piste pari a $10^{-4}D_w$ (D_w = diametro del corpo volvente) in corrispondenza del più sensibile tra i punti di contatto, o sulla pista dell'anello interno o di quello esterno, nella posizione del corpo volvente più caricato [1]. Successivamente, per

il calcolo del coefficiente di carico statico dei cuscinetti volventi, vennero introdotti nella norma ISO 76 [2] i valori massimi della pressione di contatto, pari a 4.000 MPa per i contatti lineari e a 4.200 MPa per i contatti puntiformi.

Diversamente da quello per i cuscinetti temprati a cuore, il metodo di calcolo della capacità di carico per i tipi temprati in superficie, specialmente con la tempra a induzione, non è ancora stato ben definito, nonostante gli sforzi compiuti finora [3, 4]. Ciò è dovuto al fatto che la capacità di un cuscinetto temprato in superficie dipende sia dalla profondità di tempra sia dalla resistenza del materiale del cuore. Una profondità insufficiente può dare luogo al cosiddetto collasso del cuore (core crushing), un grave danneggiamento sotto forma di fessure e di erosioni dello strato temprato, a causa dell'eccessivo scorrimento plastico nel cuore stesso.

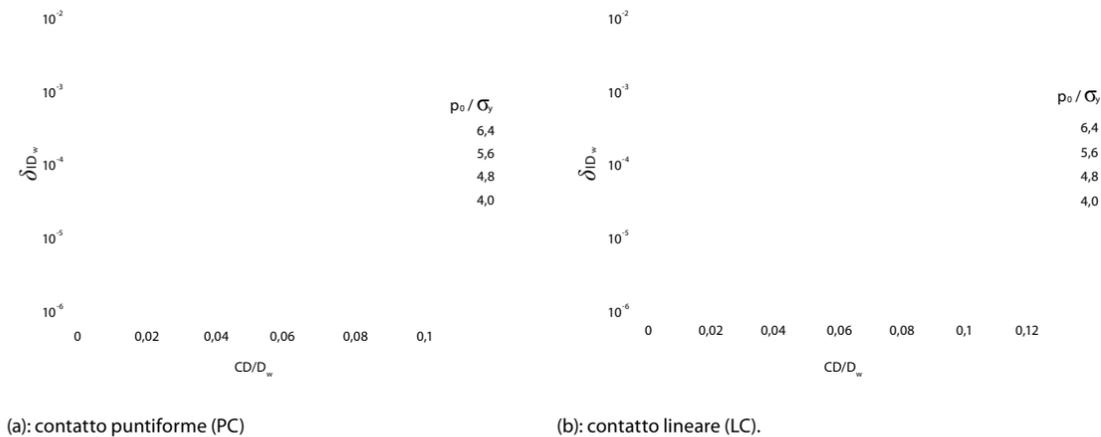


Fig. 1: Risultati dei calcoli FE sulla profondità della deformazione plastica δ in funzione della profondità di tempra CD, conseguente a carichi statici diversi in termini di pressione hertziana p_0 . δ e CD sono normalizzati rispetto al diametro D_w del corpo volvente e p_0 è normalizzata rispetto al carico di snervamento σ_y del materiale del cuore.

Il presente studio è dedicato alla capacità di carico statico dei cuscinetti con anelli temprati a induzione. Per determinarla, bisogna prendere in considerazione due aspetti legati al carico statico applicato: la deformazione permanente delle piste e il danneggiamento sotto-superficiale, il primo per mantenere la regolarità del rotolamento e il secondo per assicurare l'integrità delle piste o evitare il core crushing. Per i dettagli circa il modello adottato vedere in [5].

Modellazione della deformazione superficiale permanente e del danneggiamento sotto la superficie

Deformazione superficiale permanente

È importante considerare la deformazione permanente delle piste di un cuscinetto provocata dal carico statico. Per studiare la reazione del materiale della superficie degli anelli temprati a induzione è stata eseguita un'analisi agli

elementi finiti (FE) su una superficie temprata a induzione su cui erano presenti impronte causate da un corpo volvente. Le proprietà elasto-plastiche dei materiali dello strato superficiale e del cuore usate nell'analisi sono state determinate sperimentalmente. La fig. 1 mostra la profondità della deformazione plastica δ , ottenuta con la pressione di una sfera e di un rullo cilindrico su una superficie temprata a diverse profondità.

Per mettere in formule la deformazione plastica della superficie di un anello temprato a induzione, consideriamo in primo luogo un anello di acciaio omogeneo, ossia avente una durezza e una microstruttura uniforme su tutta la profondità, come nel caso di un anello a tutta tempra o non temprato. La profondità della deformazione plastica (δ) può essere riferita alla pressione di contatto (p_0) e al carico di snervamento del materiale (σ_y) secondo la formula

$$\frac{\delta}{D_w} = k \left(\frac{\alpha p_0}{\sigma_y} - 1 \right)^2 \quad (1)$$

In tale formula è usata la notazione di McCauley, secondo la quale il

termine tra parentesi vale zero se la quantità racchiusa è negativa. Il coefficiente α deriva dalla relazione tra la pressione di contatto p_0 e la sollecitazione massima $\sigma_{er,max}$ di von Mises sotto la superficie, cioè $\sigma_{er,max} = \alpha p_0$. Nel caso del contatto puntiforme (PC), $\alpha = 0,62$, mentre in quello lineare (LC), $\alpha = 0,56$. Il coefficiente k dipende dal carico di snervamento o dalla durezza del materiale e può essere determinato mettendo in relazione la formula con i dati dei calcoli FE in fig.1.

Se la superficie è temprata a induzione, la deformazione plastica dipende sia dallo strato indurito sia dal cuore. La ripartizione tra i due contributi dipende dalla profondità di tempra CD. Considerando ciò, possiamo scrivere:

$$\frac{\delta}{D_w} = \rho \left(\frac{\delta}{D_w} \right)_{core} + (1 - \rho) \left(\frac{\delta}{D_w} \right)_{case} \quad (2)$$

in cui $(\delta/D_w)_{case}$ e $(\delta/D_w)_{core}$ identificano rispettivamente le deformazioni plastiche dei materiali dello strato e del cuore date dalla (1). Il parametro di ripartizione ρ è funzione della profondità di tempra CD e della pressione di contatto p_0 .

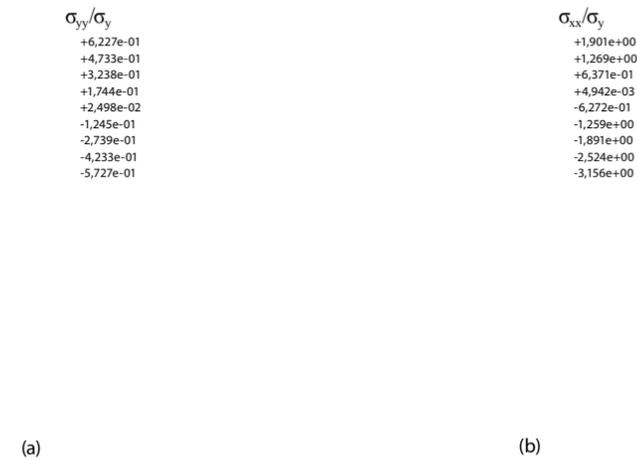


Fig. 2: (a) danneggiamento sotto la superficie in forma di sollecitazione residua indotta dalla plasticità e perpendicolare alla superficie e (b) sollecitazione residua di inflessione, parallela alla superficie, dovuta a un carico statico. La linea tratteggiata indica il confine tra lo strato temprato e il cuore. In questo calcolo $CD/D_w=0,02$, $p_0=5,4 \sigma_y$.

Tale relazione può essere rappresentata dalla

$$\rho = \exp \left[-C \left(\frac{CD}{D_w} \right)^m \left(\frac{p_0}{P_{ref}} \right)^n \right] \quad (3)$$

in cui P_{ref} è una pressione di riferimento fissata a 1.000 MPa. Le costanti C , m e n si possono determinare coniugando la (2) e la (3) con i dati di deformazione plastica ottenuti dai calcoli FE.

Per un contatto ellittico generico avente semiassi a e b , la deformazione plastica superficiale può essere approssimata mediante un'interpolazione lineare tra i due casi estremi:

$$\frac{\delta}{D_w} = \left(\frac{\delta}{D_w} \right)_{PC} \left(\frac{b}{a} \right) + \left(\frac{\delta}{D_w} \right)_{LC} \left(1 - \frac{b}{a} \right) \quad (4)$$

in cui il suffisso PC indica un contatto puntiforme, nel qual caso $b/a = 1$, mentre LC indica un contatto lineare, nel qual caso $b/a = 0$.

Danneggiamento sotto la superficie
Con l'analisi FE si può studiare il

danneggiamento sotto la superficie in termini di plasticità e sollecitazioni residue. Se la sollecitazione dovuta a un carico statico supera il carico di snervamento del materiale del cuore, quest'ultimo subisce uno scorrimento plastico. Tale fenomeno provoca un danneggiamento della superficie sottostante sotto forma di sollecitazione residua. Si consideri ad esempio il caso di una profondità di tempra ridotta ($CD = 0,02 D_w$) e di una pressione di contatto p_0 che sia 5,4 volte il carico di snervamento del materiale del cuore. La fig. 2a mostra come nella zona di transizione tra strato temprato e cuore si crei una forte sollecitazione residua di tensione, che può provocare fessure o distacchi nell'interfaccia tra i due elementi, in quanto in quel punto la sollecitazione residua è perpendicolare alla superficie. In presenza di una forte plasticità del cuore viene meno anche l'azione di supporto del cuore stesso nei riguardi dello strato temprato, il quale di conseguenza subisce una forte inflessione da parte del carico (fig. 2b). Tale inflessione, se troppo elevata, può provocare nello strato stesso delle fessure. Il core crushing è in pratica la conseguenza del deterioramento

del cuore a seguito dello scorrimento plastico, deterioramento che compromette il supporto dello strato temprato.

La sollecitazione residua S nella zona di transizione tra strato temprato e cuore si può esprimere con la formula

$$S = C_1 \sigma_y \times \left[\tan^{-1} \left(C_2 \left(\frac{\sigma_e}{\sigma_y} - 1 \right) - C_3 \right) + \tan^{-1}(C_3) \right] \quad (5)$$

in cui σ_y è il carico di snervamento nel materiale del cuore e σ_e la sollecitazione equivalente di von Mises nell'elasticità lineare in corrispondenza dell'interfaccia strato-cuore, mentre C_1 , C_2 e C_3 sono costanti determinabili coniugando la (5) con la sollecitazione residua ottenuta dall'analisi FE.

Se preesistenti nel materiale, i difetti, quali inclusioni e pori, daranno origine a fessure. Se la dimensione del difetto è $2c$, si può determinare la sollecitazione critica S_c nel punto del difetto stesso, considerando la condizione di soglia della fatica per una fessura di forma discoidale della stessa grandezza, ossia

$$S_c = \frac{\Delta K_{th}}{2} \sqrt{\frac{\pi}{c + c_0}} \quad (6)$$

dove ΔK_{th} è la soglia di fatica del materiale del cuore e c_0 viene determinata dalla

$$c_0 = \frac{\pi}{4} \left(\frac{\Delta K_{th}}{\sigma_w} \right)^2 \quad (7)$$

in cui σ_w è il limite di fatica (durata) del materiale del cuore.

La derivazione di (6) e (7) si basa sulla soluzione del fattore di intensità della sollecitazione per una fessura di forma discoidale e sul parametro di El Haddad per le piccole fessure [6].

La (6) definisce il danneggiamento tollerato in termini di sollecitazione residua di tensione indotta dalla plasticità nell'interfaccia tra strato temprato e cuore. La tolleranza dipende dalla dimensione massima dei difetti preesistenti nella zona del danneggiamento.

Verifica sperimentale

Per studiare sperimentalmente i relativi meccanismi di cedimento, è stata eseguita la prova SCF (Standing Contact Fatigue, fatica da contatto statico), che prevede l'impiego di campioni a superficie piatta sot-

toposti a impronte cicliche mediante una sfera o un rullo [7].

I campioni erano in acciaio da bonifica 42CrMo4, temprati a induzione in superficie con due diverse profondità di tempra: una poco profonda di 0,5 mm e una profonda di 1,1 mm. Per provocare l'impronta è stato impiegato un rullo cilindrico di 10 mm di diametro, a tutta tempra, bombato con un raggio di curvatura di 98 mm.

Nelle prove SCF sono stati riscontrati tre tipi di fessura, laterale, mediana e ai bordi, come indicato schematicamente in fig. 3a. Quella laterale si è formata nella zona di transizione tra strato e cuore; la fessura ai bordi ai limiti del contatto; quella mediana ha avuto inizio da quella laterale e si è propagata verticalmente verso la superficie. La fig. 3b mostra una fessura laterale completamente sviluppata senza la formazione di quelle mediana e ai bordi. La posizione e la forma della fessura laterale di fig. 3b è in buona relazione con la sollecitazione residua di tensione indotta dalla plasticità, calcolata con l'analisi FE (fig. 2a). Le fessure mediana e ai bordi indicate in fig. 3a sembrano anche coincidere con le zone di prevedibile danneggiamento indicate in fig. 2b.

Visto che la fessura di tipo laterale può aver origine da un carico

inferiore che nel caso degli altri due tipi di fessure, è ragionevole considerare il carico per la formazione delle fessure laterali come il possibile carico limite. Per il campione con strato di tempra poco profondo il carico limite corrisponde a una pressione di contatto hertziano nominale di 3,98 GPa, mentre per quello con strato profondo a una pressione di 5,46 GPa.

Con le formule (1)–(4), possiamo calcolare la deformazione plastica dei campioni SCF. La fig. 4 mostra il confronto tra i calcoli e le misurazioni, in cui sono inclusi i dati relativi al carico singolo e a quello ciclico. Le previsioni appaiono in accordo con le misurazioni.

La prova SCF è stata anche utilizzata per verificare il modello di danneggiamento tollerato. Il carico limite viene calcolato con le (5)–(7). I carichi limite di fatica previsti vengono confrontati con quelli determinati dalla prova SCF di fig. 5. Anche qui le previsioni concordano con le prove sperimentali.

Profondità di tempra e capacità di carico statico
Sulla base delle considerazioni circa la deformazione plastica sulla pista e il danneggiamento sotto la superficie nell'interfaccia strato temprato-cuore, si propone un nuovo modello per calcolare il

coefficiente di carico statico degli anelli temprati a induzione.

In primo luogo dimostriamo la dipendenza dei carichi ammissibili calcolati, basandoci su considerazioni circa la deformazione plastica della superficie e il danneggiamento tollerato sotto la superficie, rispettivamente in termini di profondità di tempra (CD) e di resistenza del materiale. Per i calcoli scegliamo un cuscinetto a sfere a quattro contatti, avente: diametro medio $d_m = 615$ mm, diametro sfere $D_w = 34,925$ mm, osculazione $f = 0,52$, angolo di contatto $\alpha = 45^\circ$. Consideriamo inoltre due materiali per il cuore: materiale A, con un carico di snervamento di 740 MPa, e materiale B, con carico di snervamento di 330 MPa.

Sono stati fatti calcoli della pressione massima di contatto p_0 capace di generare una deformazione plastica di $10^{-4} D_w$ per differenti profondità di tempra. La fig. 6a mostra che la pressione di contatto aumenta con l'aumentare dei valori di CD e si avvicina a un valore costante se i valori di CD sono elevati. L'indipendenza della pressione ammissibile di contatto dalla CD è l'indizio che siamo di fronte a una situazione analoga a quella di una tempra a cuore. Una profondità CD superiore a $0,18 D_w$ è pressoché equivalente ad una tempra a cuore per entrambi i materiali.

Secondo il presente modello si può vedere come la pressione di contatto, atta a provocare una deformazione plastica pari a $10^{-4} D_w$ in una pista a tutta tempra, sia di 4.270 MPa, il che è conforme con la pressione massima (4.200 MPa), per il calcolo della capacità di carico statico dei cuscinetti a sfere secondo la ISO 76 [2].

La fig. 6b mostra come il carico statico di contatto che può innescare fessure sotto la superficie sia funzione della CD. Naturalmente, il carico ammissibile aumenta con l'aumentare dei valori della CD e dipende anche dalla purezza dell'acciaio (dai difetti o dalla

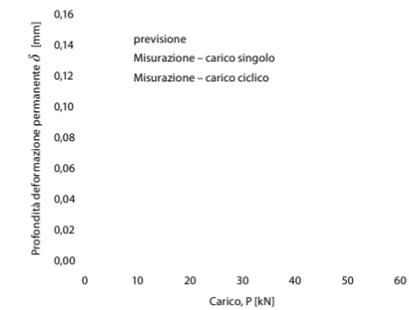


Fig. 4: Confronto tra le deformazioni superficiali residue, prevista e misurata, nei campioni delle prove SCF (CD = 1,1 mm).

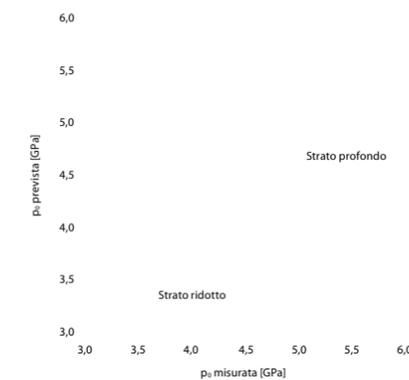


Fig. 5: Confronto tra il carico limite statico previsto e quello misurato relativo all'innescò della fessura laterale sotto la superficie nel campione con strato temprato ridotto (profondità = 0,5 mm) e in quello con strato profondo (profondità = 1,1 mm) nella prova SCF. Nei calcoli si ipotizzano difetti di dimensioni diverse, in particolare ●: nessun difetto, ◆: 60 μ m e ▲: 150 μ m.

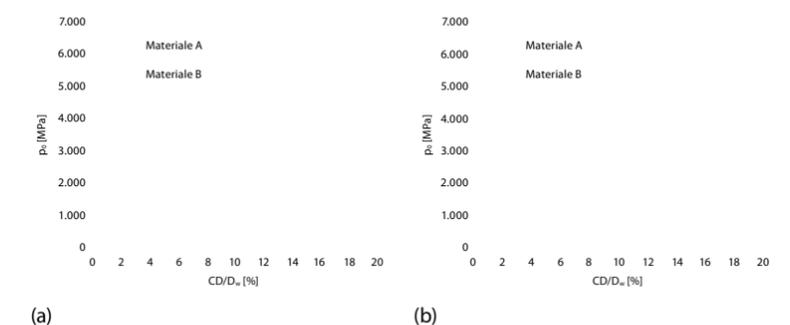
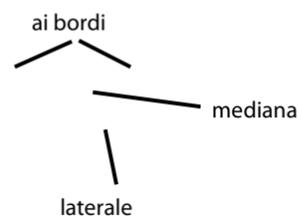


Fig. 6: Carico statico calcolato in termini di pressione di contatto p_0 , corrispondente a una impronta superficiale pari a $10^{-4} D_w$ (a), e carico statico ammissibile in termini di pressione di contatto p_0 tale da non provocare fessure sotto-superficiali (b), per due diversi materiali degli anelli temprati a induzione con varie profondità di tempra.



(a)

(b)

Fig. 3: (a) illustrazione di tre tipi di fessura osservati nei campioni usati nelle prove SCF: laterale, ai bordi e mediana; (b) fotografia di una fessura laterale sviluppata nella zona di transizione tra strato temprato e cuore del campione.