

EVOLUZIONE DI STRUTTURA, STATO TENSIONALE E MICRODUREZZA DELLE SUPERFICI IN ATTRITO DOVE SONO USATI LUBRIFICANTI CON IL RIVITALIZZANTE™

Presentiamo l'evoluzione della superficie di un cuscinetto di rotolamento durante il suo funzionamento immerso in materiale lubrificante trattato con il rivitalizzante. Con i metodi della diffrattometria a raggi X e con il microscopio elettronico, microindentiamo la struttura sotto esame, le sue condizioni sotto sforzo e le caratteristiche meccaniche delle superfici in frizione. L'entità delle macrotensioni sul percorso di rotolamento in senso radiale e in senso tangenziale sono state esaminate con il metodo $\sin^2\psi$. Vengono discussi i risultati dell'esperienza, ovvero come variando i cicli di fatica del cuscinetto sotto sforzo varino anche le sue caratteristiche meccaniche durante il funzionamento.

Attualità e impostazione del problema

Al fine di aumentare le risorse dei componenti dei giunti e dei meccanismi in attrito, nella loro produzione sono usate largamente varie tecnologie per aumentare la resistenza della superficie. Recentemente si sono diffuse tecnologie di ristabilimento e di consolidamento tribotecnico che comprendono l'uso di rivitalizzanti, ossia di aggiunte ceramiche ai materiali lubrificanti [1].

Si sa [2] che l'uso dei rivitalizzanti™ provoca la tribomodificazione dei pezzi metallici. Sulla loro superficie si formano delle solide strutture metalloceramiche [1, 2]. Una delle condizioni necessarie per la modificazione è il funzionamento degli accoppiamenti sia nel regime della lubrificazione per accostamento, che in quella mista. In seguito alla modificazione cambiano ruvidità, composizione chimica, durezza dello strato superficiale dei metalli. Invece al livello macro si notano la riduzione del coefficiente di attrito e la trasformazione della coppia in attrito in un accostamento quasi invariabile, così come registrato dai metodi di emissione acustica [3]. Inoltre mancano le informazioni sulla cinetica del cambiamento delle proprietà delle superfici in attrito quali: struttura, tensioni, durezza. Da un punto di vista teorico e pratico, assume particolare interesse lo studio dell'evoluzione dello stato della superficie in attrito durante il funzionamento, dove siano stati usati lubrificanti con il rivitalizzante™. Il presente lavoro è dedicato appunto a questo studio.

Oggetto dello studio

Come oggetto di studio è stata presa la superficie di lavoro piatta di un cuscinetto a rulli di spinta di serie (81102) fabbricato in acciaio (100Cr6) trattato termicamente per ottenere una struttura martensitica, in posizione iniziale (imm. 1). Il diametro esterno del pezzo è di 28 mm, quello interno è di 15 mm, lo spessore 3 mm. Il separatore del cuscinetto comprende 12 rulli con diametro di 3,5 mm e larghezza di 3 mm.



Immagine 1. La vista generale del cuscinetto

Lubrificazione

In qualità di lubrificante del cuscinetto è stato usato il lubrificante a base litio multiuso (ISO-L-XBCEB 2) con l'aggiunta di un 10% di rivitalizzante™. Il rivitalizzante™ è un prodotto nanotecnologico brevettato della XADO Chemical Group (Kharkov, Ucraina). La suddetta aggiunta alle sostanze lubrificanti (oli, lubrificanti, liquidi di funzionamento) è stata progettata per modificare le superfici in attrito durante il loro funzionamento.

Il rivitalizzante™ è composto da particelle di nanodimensione (2–25 nm) di ossidi (idrati di ossidi) di alluminio, silicio, ferro, magnesio e altri elementi.

Modificazione della superficie dell'oggetto dello studio

La modificazione della superficie di lavoro del cuscinetto si svolgeva direttamente nel corso del suo funzionamento sull'impianto di attrito secondo lo schema (imm. 2). Quindi è stato realizzato il massimo attrito cinematico che ha causato il rotolamento del rullo accompagnato da scivolamento: una superficie piatta e fissa a contatto con un corpo che rotola lungo una linea.

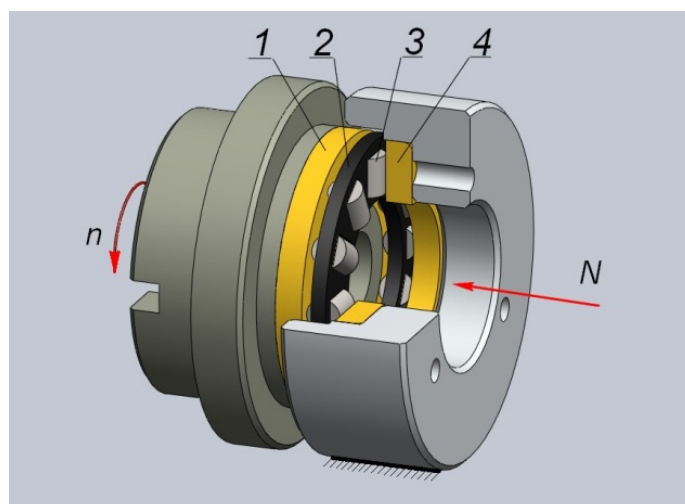
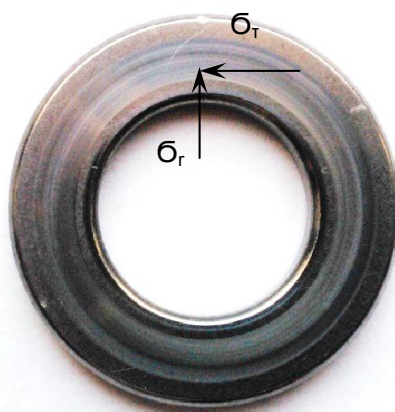


Immagine 2. Schema del giunto di prova: 1 – la parte mobile del cuscinetto; 2 – separatore; 3 – rullo; 4 – la parte immobile; n – rotazione; N – carico

Nel corso delle prove si stabilivano il carico e la frequenza di rotazione, si registravano l'intervallo di funzionamento del cuscinetto sotto carico e la temperatura della parte immobile. Durante tutte le prove il carico dell'asse (3000 N) e la frequenza di rotazione (1000 min^{-1}) erano invariati; variava invece l'intervallo di funzionamento del cuscinetto. La temperatura della parte immobile del cuscinetto che veniva registrata dalla termocoppia a contatto e dall'emissione di raggi infrarossi, durante le prove non superava $+ 70 \text{ }^\circ\text{C}$.

All'inizio si studiavano le caratteristiche della superficie iniziale del cuscinetto nel momento della consegna dalla fabbrica. In seguito si studiavano le caratteristiche della superficie nel corso del funzionamento del cuscinetto con applicazione di lubrificante e del rivitalizzante™ dopo 5, 10, 15 e 20 ore. Prima dell'inizio di ogni prova nel cuscinetto veniva aggiunto nuovo grasso lubrificante.

Durante il funzionamento del cuscinetto sulla sua superficie di lavoro si formava una traccia sotto forma di una striscia di rotolamento (imm. 3), sulla quale venivano studiate le caratteristiche superficiali del materiale.



*Immagine 3. La superficie modificata dell'oggetto dello studio:
lo schema rappresenta l'azione delle tensioni σ_r – radiale e σ_t – tangenziale*

Metodi di studio della superficie

Si sa [1, 4] che aggiungendo sostanze metalloceramiche ai lubrificanti la profondità dello strato modificato dei pezzi in attrito può misurare da poche unità di micron fino a decine di micron. Quindi per lo svolgimento delle prove e le misurazioni sono stati scelti i metodi di diffrattometria radiografica, microscopia elettronica e microindentazione che hanno permesso di ottenere le informazioni sullo strato superficiale dell'oggetto in questione.

Le informazioni sulla struttura e sulle tensioni della superficie del cuscinetto sono state ottenute analizzando la posizione, l'intensità e la forma delle linee di diffrazione durante le prove

di struttura radiografica. Le prove sono state realizzate con un diffrattometro radiografico ad emissione di anodo di rame con tensione accelerata di 30 kV e corrente di 20 mA. Per superare l'emissione fluorescente degli elementi con numero atomico $Z < 29$ ($Z_{Cu} = 29$) è stato usato il monocromatore a fascio diffragato di grafite pirolitica. Le immagini sono state prese in regime di scannerizzazione θ - 2θ , con registrazione di flusso dell'intensità con intervallo $0,15^\circ$.

Il livello delle macrotensioni elastiche superficiali (tensioni del 1-mo tipo) sono state valutate in due direzioni, quella $\bar{\sigma}_r$ – radiale e quella $\bar{\sigma}_t$ – tangenziale (imm. 3). E' stato usato il metodo $\sin^2\psi$, cioè il metodo delle riprese inclinate [5]. Questo metodo ci permette di misurare le distanze tra le superfici del reticolo cristallino del materiale, parallelamente alla superficie studiata, nella direzione scelta e in quella ad essa perpendicolare. Inoltre il metodo dà la possibilità di valutare la deformazione e di misurare le tensioni elastiche corrispondenti.

Lo spessore dello strato superficiale che ci ha fornito i dati sulla dispersione nella struttura e sulle tensioni durante l'analisi di struttura radiografica era equivalente a circa 10 mcm.

Le Informazioni sulle caratteristiche meccaniche dello strato superficiale sono state ottenute tramite la microindentazione. Applicando questo metodo, si ottengono le caratteristiche del materiale con strato superficiale di profondità di qualche decina di micron. Durante le prove la microdurezza è stata misurata con il metodo di impronta ristabilita, cioè con l'inserimento del penetratore di diamante di Vickers. La forma della superficie di lavoro della punta rappresenta una piramide a forma di tetraedro con una base quadrata e l'angolo in cima pari a 136° . La microdurezza è stata misurata sotto carico di 1,96 N il che non ha permesso alla punta di penetrare per più di 10 mcm.

Risultati delle prove

Evoluzione della struttura

Nell'imm. 4 si può vedere il diffrattogramma ottenuto dalle prove di struttura radiografica, con largo intervallo degli angoli secondo la geometria focalizzata di Bragg-Brentano. Sempre nell'imm. 4 si vedono la superficie del cuscinetto e la striscia di rotolamento dopo 20 ore di funzionamento del cuscinetto. Nel diffrattogramma, tra parentesi sono indicati gli indici di Miller delle superfici riflesse del reticolo cubico con volume centrato α -Fe. Partendo dall'analisi del diffrattogramma, si evince che la struttura iniziale del materiale della superficie era in uno stato nanodispersivo. La coincidenza del diffrattogramma della superficie iniziale e di quello dopo 20 ore di funzionamento (secondo la posizione, l'intensità e la larghezza delle linee diffrattive) dimostra l'assenza di cambiamenti di fase o chimici sulla striscia di rotolamento. Quindi nel corso di questo periodo lo stato nanodispersivo è rimasto invariato. La dimensione delle zone di dispersione coerente era di ~ 17 nm ed è rimasta costante durante l'intero esperimento.

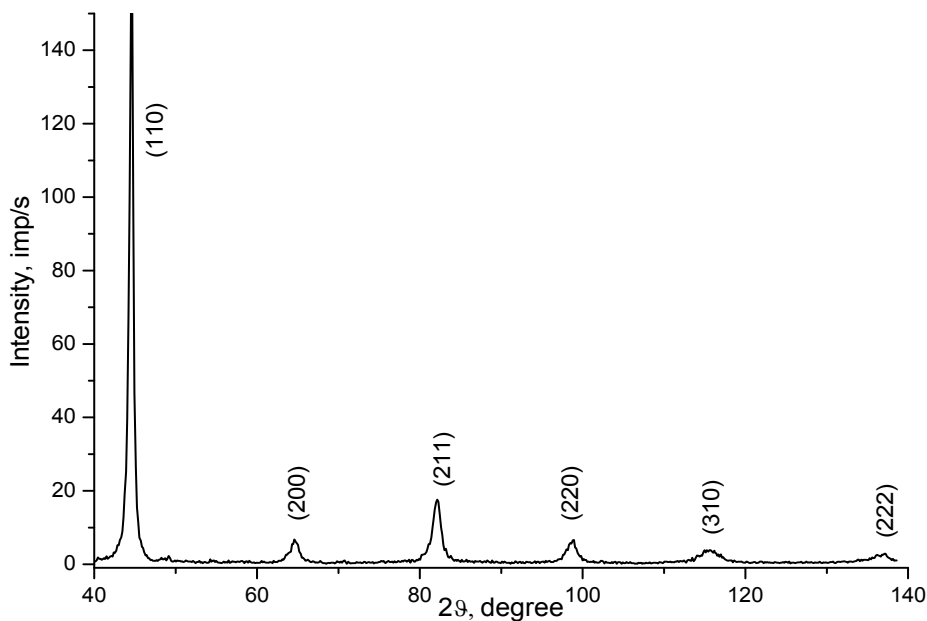


Immagine 4. Il diffrattogramma della superficie del cuscinetto e della striscia di rotolamento dopo 20 ore di funzionamento

Evoluzione dello stato tensionale

In presenza del rivitalizzante™ i processi di interazione di frizione provocano la modificazione degli strati superficiali. La formazione dello stato tensionale nello strato superficiale viene influenzata da tre fattori: quelli di forza, di calore e di fase [6]. Visto che durante l'esperimento non sono state registrate modificazioni di fase e il livello del carico di calore era abbastanza basso (+ 70 °C), risulta che il carattere dello stato tensionale è stato influenzato maggiormente dal fattore di forza.

Per valutare l'evoluzione dello stato tensionale piatto sono state misurate le tensioni elastiche rimanenti, esse sono state valutate in due direzioni, in quella σ_r – radiale e in quella σ_t – tangenziale.

Lo stato tensionale iniziale della superficie era caratterizzato dall'alto livello delle tensioni comprimenti simmetriche nella direzione radiale e in quella tangenziale ($\sigma_r \sim \sigma_t \sim 1,5$ GPa).

Durante il funzionamento del cuscinetto lo stato simmetrico tensionale e piatto della superficie si trasforma in quello asimmetrico (imm. 5).

Il livello delle tensioni comprimenti in direzione tangenziale mantiene il livello dei valori iniziali ($\sigma_t \sim 1,5$ GPa). Le tensioni comprimenti in direzione radiale aumentano con l'aumento del tempo di funzionamento e raggiungono un valore paragonabile al limite della resistenza ($\sigma_r \sim 2,1$ GPa).

Il nostro interesse viene attratto dal passaggio dello stato tensionale piatto superficiale da simmetrico ad asimmetrico. La differenza riscontrata nelle tensioni comprimenti lungo gli assi radiali e tangenziali dopo 20 ore di lavoro del meccanismo può essere spiegata come

di seguito: possiamo immaginare le particelle di rivitalizzante come nanosfere che bombardando la superficie metallica ne provocano l'incrudimento e tale processo di modificazione della superficie come una nanopallinatura.

Analizziamo i contatti tra le particelle e la superficie in oggetto. La superficie bombardata con le nanoparticelle si irrobustisce sia in senso radiale che tangenziale.

Poichè per attrito le particelle di rivitalizzante vengono spostate lungo tutta la superficie nel loro movimento, davanti ad esse in senso tangenziale si formano delle tensioni di compressione e dietro tensioni di allentamento [7], in tal modo la somma delle azioni delle particelle sulla superficie in senso tangenziale si annulla e qui il rafforzamento non ha luogo.

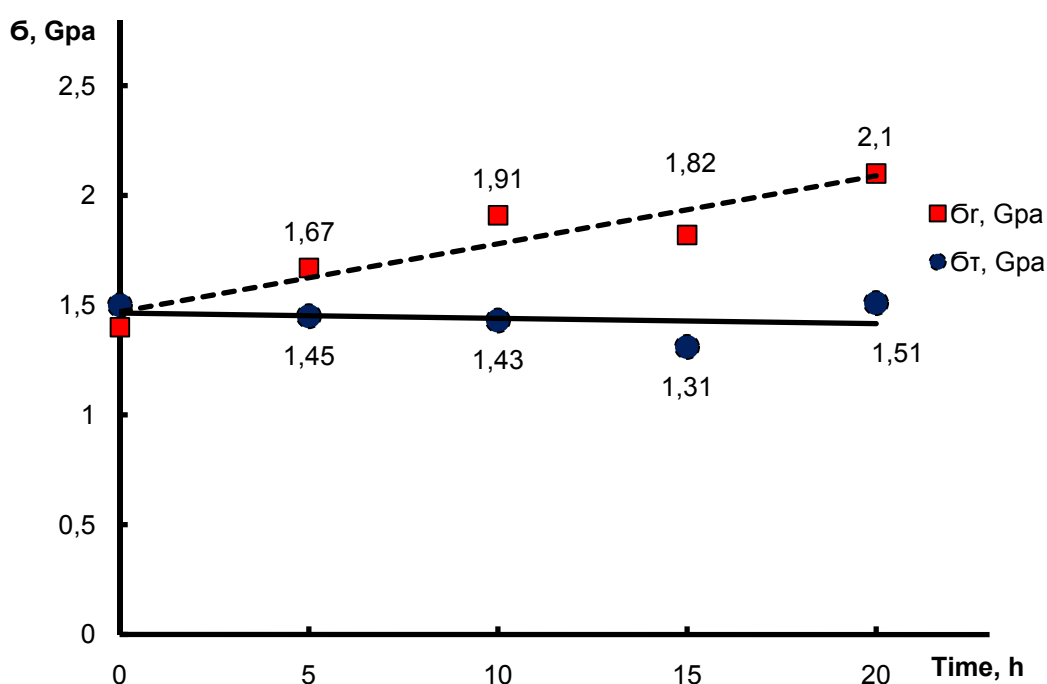


Immagine 5. Evoluzione delle tensioni comprimenti

Evoluzione della microdurezza

Durante le prime 5 ore di lavoro si è osservato l'aumento della microdurezza, ma nelle successive 15 ore la microdurezza praticamente non cambiava. L'andamento della microdurezza sotto carichi di 1,96 Newton in funzione del tempo è mostrato nella tabella 1.

Tabella 1

Tempo dell'esperimento, h	Condizioni iniziali	5	10	15	20
HV200	668	860	906	893	897

Conclusioni

Conseguentemente, studiando l'evoluzione delle caratteristiche della superficie di lavoro del cuscinetto da noi investigata dopo l'applicazione di grasso lubrificante con rivitalizzante, vediamo che nel periodo dell'esperimento pari a 20 ore di lavoro sotto un carico costante, la superficie del cuscinetto rimane in condizioni di alta dispersità. Al diffrattogramma, non sono stati rilevati cambiamenti nel campo della disgregazione coerente. Non sono stati osservati cambiamenti di fase del metallo. Però è stato osservato il passaggio dallo stato tensionale piatto, da simmetrico ad asimmetrico. Durante il processo di lavorazione del cuscinetto le tensioni comprimenti in direzione radiale aumentano mentre quelle in direzione tangenziale rimangono invariate.

Bibliografia

1. Войтов В.А. Технологии триботехнического восстановления, обзор и анализ перспектив. // Проблемы трибологии. – 2005. – № 2 – с.86 – 94.
2. Трибологія: підручник / М.В. Кіндрачук, В.Ф. Лабунець, М.І. Пашечко, Є.В. Корбут. – К. : НАУ-друк, 2009. – 392 с.
3. Стадниченко В.Н. Об образовании и функционировании металлокерамического покрытия, полученного с помощью ревитализантов / В.Н. Стадниченко, Н.Г. Стадниченко, Р.Н. Джус, О.Н. Трошин // Вестн. науки и техн. – Х.: ХДНТ и НТУ “ХПИ”. – 2004. – Вып. 1(16). – С. 18-27.
4. Зозуля В.Л. Ревитализация промышленного оборудования – одно из направлений энерго- и ресурсосбережения. /Исаков Д.И. //Экология и промышленность. – 2013. - №1 – с. 48-50.
5. NOYAN, I.N., COHEN, J.B., Residual Stress Measurement by Diffraction and Interpretation Springer-Verlag, New York (1987).
6. Качество поверхностного слоя и усталостная прочность деталей из жаропрочных и титановых сплавов / А. М. Сулима, М. И.Евстигнеев. М.: Машиностроение, 1977, – 256 с.
7. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. - 526 с.

V. Zozulia, D. Isakov, XADO, Ukraine

Z. Kolupaieva, A.Pugachev, S.Syrovitskii, NTU KhPI, Ukraine

EVOLUTION OF THE STRUCTURE, STRESS CONDITION AND MICROHARDNESS OF A FRICTION SURFACE WHEN USING LUBRICANTS WITH REVITALIZANT™.

The article describes evolution in the condition of the friction surface of a thrust roller bearing during its operation with a lubricant containing Revitalizant™. The structure, stress condition and mechanical properties of the friction surface were examined by means of X-ray diffractometry, electron microscopy, and microindentation. The values of macrostresses on the roller path in the tangential and radial directions were determined by $\sin^2\psi$ method. The examination results are discussed as a function of cycles (operating period) of the bearing under a fixed load.

During the 20-hour experiment under constant load the bearing's operating surface has remained in a fine dispersed state. No essential changes in the coherent scattering areas have been detected. No phase state changes have been observed. During the first five hours of bearing operation an increase in microhardness was observed; the microhardness did not noticeably changed during the further 15 hours. At the same time we can report a transition from the symmetrical plain stress condition to the dissymmetrical one. During the bearing's operation time the compressing stress increases in the radial direction, and remains unchanged in the tangential direction.