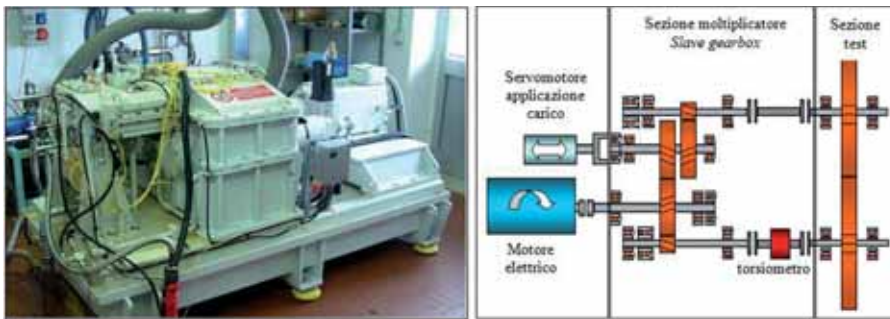


Ingranaggi ad alte prestazioni



1. Banco prova per ingranaggi a ricircolo di potenza (a); schema cinematico (b).

Il Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Nucleare e della Produzione (DIMNP) dell'Università di Pisa e la società Avio conducono da anni un'estesa attività sperimentale, dedicata allo studio di diverse forme di danneggiamento di ingranaggi di impiego aeronautico con elevate prestazioni, contribuendo al miglioramento della conoscenza delle principali modalità di danneggiamento degli ingranaggi (bending, micropitting, pitting, scuffing) in condizioni normali ed estreme di funzionamento [1,2,3].

In molte applicazioni aeronautiche, la capacità degli organi di trasmissione di potenza di sopportare eventi di sospensione della lubrificazione, senza che sia pregiudicata la capacità di trasmettere il carico, rappresenta un problema estremamente delicato, molto difficilmente affrontabile con soli approcci analitici o numerici. Sono state

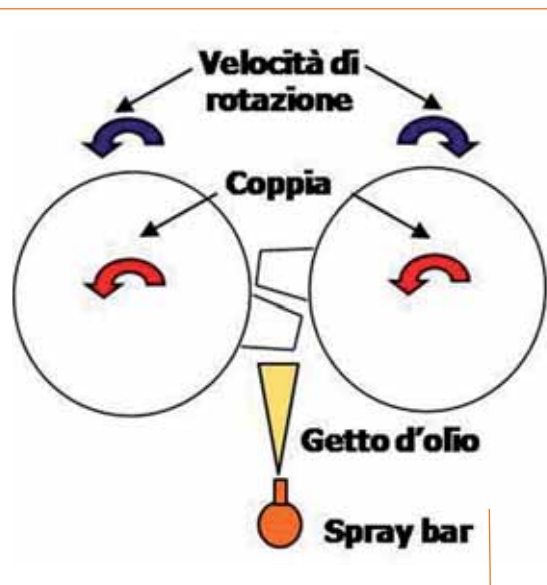
quindi condotte le prove con lo scopo di verificare il comportamento di una coppia di ingranaggi cilindrici in caso di temporanea sospensione (oil off) della lubrificazione. Le prove, eseguite su ruote con grado di finitura superficiale molto elevato, in funzionamento con elevati valori di velocità e di pressione superficiale, sono state programmate con la finalità di analizzare due fenomeni: il tempo necessario all'insorgere del danneggiamento dal momento della sospensione della lubrificazione e le modalità e i tempi di propagazione del danneggiamento una volta che questo si è instaurato.

Apparato sperimentale

Banco prova

In figura 1 è mostrato il banco prova utilizzato. Esso è costituito da una catena cinematica chiusa che può essere caricata fino a

Tra università e impresa è stata condotta un'indagine sperimentale, destinata a valutare l'insorgere di usura adesiva distruttiva negli ingranaggi realizzati con materiali innovativi e con l'uso di lubrificante sintetico, nel caso di momentanea interruzione del suo flusso



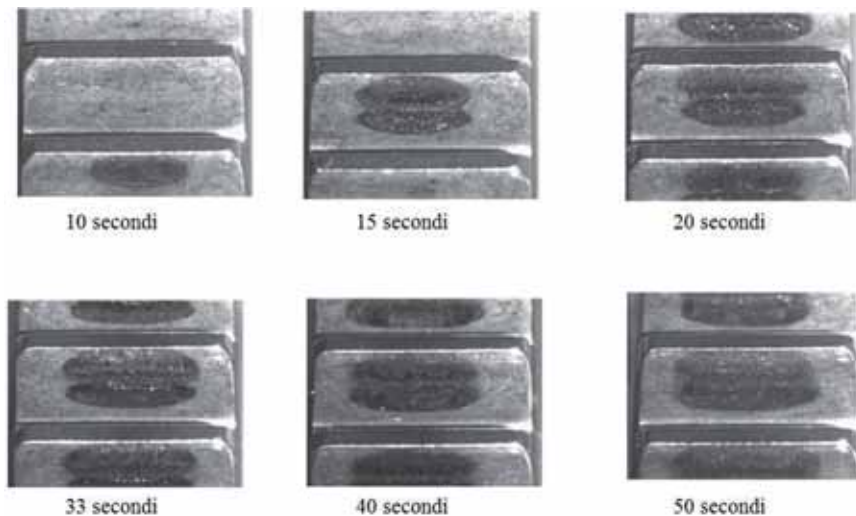
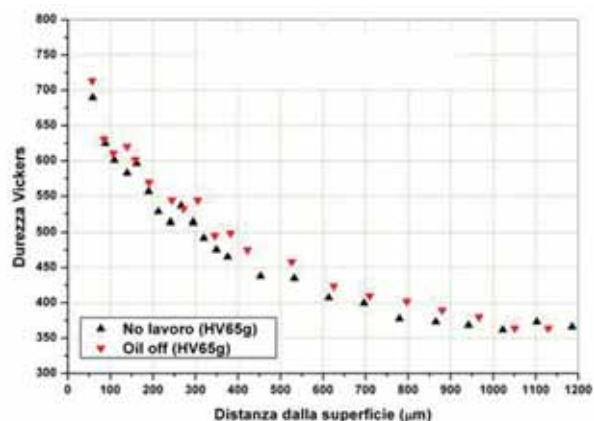
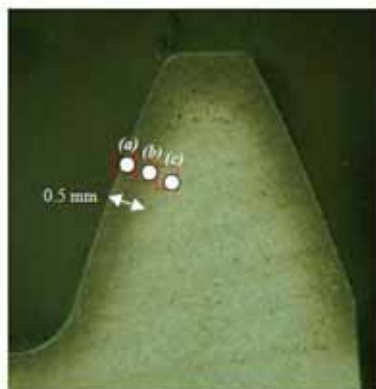
2. Posizione dell'ugello di lubrificazione delle dentature in prova.

4. Sezione del provino metallografico dopo attacco Nital (a); confronto fra valori di microdurezza dopo un tempo di oil off di 40 secondi e su un fianco non caricato in prova (b).

un valore di coppia circolante di 500 Nm, attraverso la traslazione orizzontale dell'albero di carico dotato di ruote elicoidali. La massima velocità di prova è pari a 18000 giri al minuto, corrispondenti, a massimo carico, alla potenza circolante nel sistema di circa 1 MW.

Il banco è dotato di due torsimetri per la misura della coppia circolante; di 20 termocoppie installate sulle piste esterne di tutti i cuscinetti; di 4 accelerometri per il monitoraggio del comportamento vibratorio con calcolo on-line dei principali parametri statistici di interesse diagnostico. È prevista la lubrificazione termoregolata e indipendente delle dentature in prova con olio di impiego aeronautico (MIL-PRF-23699F) a base di e-

3. Progressione del danno per differenti durate dell'interruzione del lubrificante (ruota condotta).

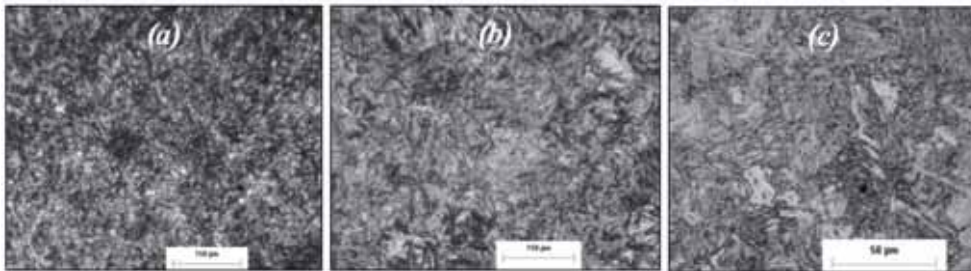


steri del neopentilicolic, additivato, avente caratteristiche di stabilità alle elevate temperature.

Nel corso di queste prove, l'ingranamento è stato alimentato da una spray bar collocata nella zona sottostante alle dentature stesse: con l'interruzione della pompa di mandata, il getto d'olio cessa immediatamente di lubrificare la zona di ingranamento, senza che quest'ultima sia raggiunta da perdite di lubrificante presente nei condotti (figura 2).

Ruote dentate in prova

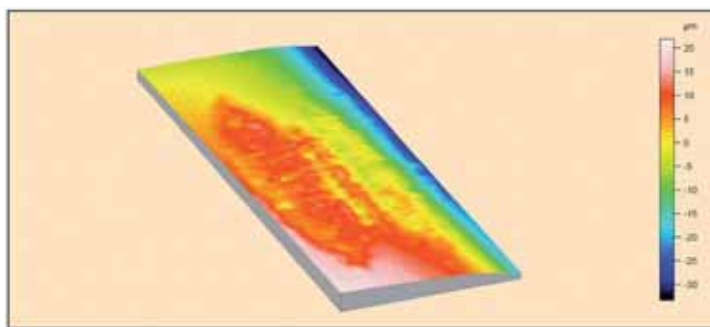
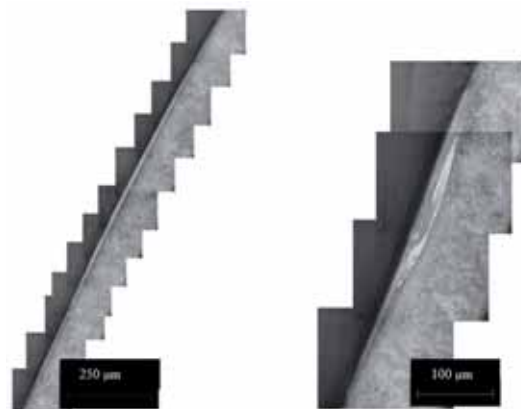
Le ruote utilizzate per le prove sperimentali hanno 80 denti diritti, diametro primitivo



6. Anomalia della microstruttura sullo strato superficiale dovuta al surriscaldamento.

pari a 140 mm, modifica di profilo con spoglia a profilo parabolico. Tali ruote presentano inoltre una bombatura circolare di 40 mm lungo la larghezza di fascia, introdotta per accrescere il valore della pressione di contatto. La qualità della lavorazione AGMA è pari a 11,9. Il materiale di costruzione delle ruote in prova è un acciaio da cementazione innovativo di impiego aeronautico, in grado di mantenere proprietà meccaniche elevate anche in caso di esposizione prolungata ad elevate temperature. Tali ruote, dopo un trattamento di cementazione e rettificazione, sono state sottoposte ad un trattamento di superfinitura superficiale isotropica, che ha permesso di ottenere un grado di finitura superficiale particolarmente spinto ($Ra < 0,1 \mu\text{m}$).

5. Aspetto della struttura cristallina nella zona esterna cementata (a), nella zona di transizione (b) e nel cuore del dente (c).



7. Topografia della superficie danneggiata.

Attività sperimentale

Scelta delle condizioni di prova

In mancanza di approcci analitici consolidati e dati sperimentali di confronto, per poter effettuare una prima analisi delle condizioni di prova e procedere alla pianificazione di queste ultime, è stato utilizzato un modello semplificato basato sulle ipotesi di Blok per il calcolo della temperatura flash e, quindi,

riconducibile alle indicazioni della normativa AGMA 925-A03. Noto l'andamento delle pressioni di contatto (calcolato con codice di calcolo dedicato: Calyx) e delle velocità di strisciamento lungo l'ingranamento, stimato il valore del coefficiente di attrito, è

possibile valutare la quantità di calore generata durante l'ingranamento e simulare, quindi, il transitorio termico delle ruote. In base alle simulazioni effettuate sono state scelte delle condizioni di prova tali da garantire l'insorgere dello scuffing.

Prove effettuate

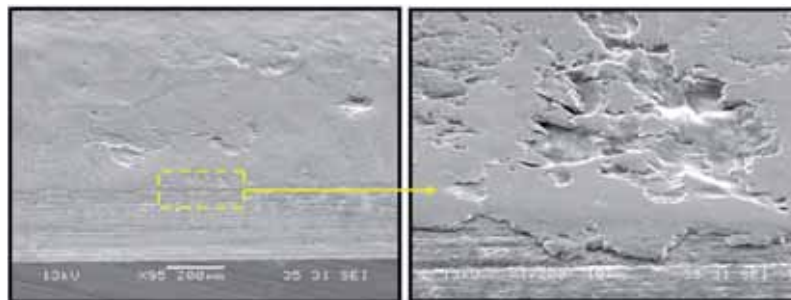
Sono state effettuate 6 prove di oil off con valori di velocità e coppia pari rispettivamente a 13000 giri/min ($\approx 100 \text{ m/s}$ sul diametro primitivo) e 500 Nm. La temperatura di alimentazione del lubrificante era pari a 120°C , con una portata di circa 4 l/min.

Una volta raggiunto lo stazionario termico, la mandata dell'olio veniva interrotta per essere poi riattivata, al termine del previsto tempo di oil off, prima di procedere all'arresto del banco. L'insorgere del danneggiamento, accompagnato da un'evidente variazione della risposta vibratoria del banco, si è manifestato, per ogni prova effettuata, dopo

un periodo pressoché costante di interruzione del lubrificante. Sono state effettuate prove con differenti durate del tempo di oil off al fine di caratterizzare la corrispondente progressione del danneggiamento, fino ad individuare la fase di danno incipiente.

Come è possibile osservare in figura 3, il danneggiamento parte dall'addendum della ruota condotta e procede nel tempo verso la circonferenza primitiva. Per verificare il tipo e la severità del danneggiamento, sono state eseguite sulle dentature provate diverse indagini, da prove di microdurezza a osservazioni metallografiche sulla sezione dei denti.

L'attacco Nital e l'analisi metallografica non hanno mostrato significative differenze fra le diverse ruote campione analizzate. Si riportano, a titolo di esempio, i risultati relativi a ruote sottoposte ad un tempo di oil off di 40 secondi. In figura 4 (a) è mostrata la sezione di un provino in cui è possibile apprezzare la penetrazione del trattamento di cementazione. Sulla stessa figura sono indicate le zone oggetto di osservazione della struttura metallografica e i punti di misura della microdurezza, unitamente al grafico dei valori ottenuti in funzione della distanza dalla superficie (figura 4 (b)). La figura 5 (a) rappresenta la zona superficiale del dente, trattata con il processo di cementazione, la cui microstruttura risulta omogenea. In figura 5 (c) si nota, in corrispondenza del cuore del provino, la tipica struttura di martensite rinvenuta, caratterizzata dalla presenza di forme aciculari, formate da aghetti e placchette. Nella figura 5 (b) si riconoscono entram-



9. Analisi SEM delle superfici danneggiate.

Dettaglio testa dente.

l'alterazione metallurgica del materiale (anche nel caso di tempi prolungati di sospensione della lubrificazione).

E. Manfredi, E. Ciulli, S. Manconi, S. Iliano, Università di Pisa, Dipartimento di Ingegneria Meccanica Nucleare e della Produzione.

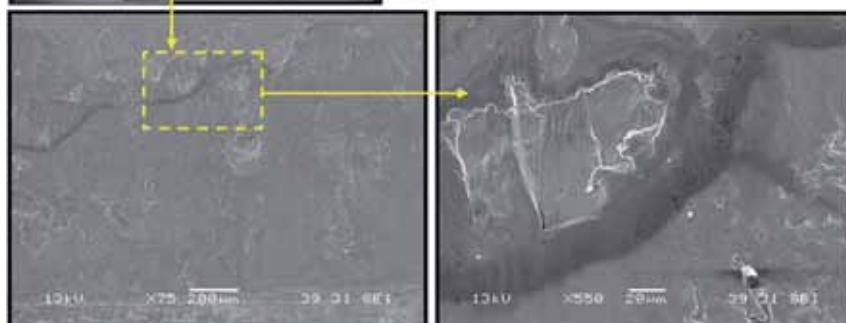
A. Polacco, Avio Propulsione Aerospaziale, Rivalta di Torino.

readerservice.it n. 70

be le microstrutture precedenti, a caratterizzare la transizione tra la zona cementata e il cuore del provino. L'analisi metallografica ha messo in evidenza la presenza di alcune anomalie della microstruttura sullo strato superficiale, da attribuire a modifiche metallurgiche, indotte dal forte riscaldamento locale [4,5]. Esse si mostrano al microscopio con l'aspetto indicato in figura 6 e risultano estese lungo una significativa porzione del fianco caricato del dente, con profondità massima di circa 15 mm. L'analisi dello stato delle superfici è stata completata mediante la ricostruzione della topografia superficiale e l'osservazione SEM. In figura 7 è mostrata la topografia superficiale di un dente, dalla quale è possibile valutare l'estensione dell'area danneggiata e la profondità dei crateri prodotti. In figura 8 e in figura 9 è mostrata la morfologia della zona danneggiata, la presenza di materiale fuso e la formazione di crateri. La progressione del danneggiamento al crescere del periodo di oil off è molto marcata sulla superficie di contatto mentre lo è molto meno dal punto di vista del-



8. Analisi SEM delle superfici danneggiate. Ricostruzione di un fianco attivo, dettagli a diversi livelli di ingrandimento.



Bibliografia

Andrei G. L., Manconi S., Manfredi E., Vitali M., Attrezzature per prove su ingranaggi ad alte prestazioni, Atti del XXX Congresso AIAS, Alghero, 12-15 settembre 2001.

Amorena M., Bragallini G.M., Manconi S., Manfredi E., Vitali M., Characterization of Aerospace Gears by High Speed Testing, Proceedings of the International Conference GEARS 2005, München 14-16.9.2005, VDI-Berichte 1904.2. 1091-1105, (2005).

Bassani R., Ciulli E., Manfredi E., Manconi S., Polacco G. and Pugliese G., Experimental study on wear and fracture in aeronautical gear transmissions, Proceedings of ESDA06, 8th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis, Torino, July 4-7, 2006.

O.O. Ajayi et al., Microstructural evolution during scuffing of hardened 4340, Tribology Int., 38 (2005), 277-282.

B. - R. Höhn, Modern Gear Calculation, Int. Conf. On Gears, München, 2002.