

CARATTERIZZAZIONE SPERIMENTALE DELLA RESISTENZA DI DENTATURE AERONAUTICHE

E. Manfredi^{a}, S. Manconi^a, A. Polacco^b*

^a Università di Pisa, Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Nucleare e della Produzione

^b AVIO Propulsione Aerospaziale SpA, Rivalta di Torino

Sommario

Si riassumono le attività sperimentali condotte tramite un nuovo banco prova ingranaggi, circa il quale si era già riferito in [1].

Della prima fase dell'attività sperimentali, rivolta alla caratterizzazione della resistenza di dentature campione nei confronti della resistenza a rottura ed a danno superficiale, si illustrano i procedimenti adottati, sia sperimentali che di calcolo, per determinare le condizioni di prova.

Si commentano quindi alcuni risultati ottenuti e si forniscono informazioni sulle prossime attività di ricerca, che comprendono anche il perfezionamento dei metodi per la diagnostica degli ingranaggi.

Abstract

This paper describes the experimental program carried out by means of a new gear test rig, which has been described at a previous AIAS Conference [1].

The results of a first test phase about the characterization of gear bending fatigue and compressive stress resistance are briefly outlined. The experimental and numerical methods are illustrated. They have been aimed at accurately evaluating the test conditions.

In a second test phase, the problem of scuffing will be studied and an effort will be made to develop better diagnostic approaches.

Parole chiave: dentature, fatica, danni superficiali, diagnostica

1. INTRODUZIONE

Le trasmissioni meccaniche ad ingranaggi, presenti negli aeroplani, negli elicotteri e nei convertiplani ed usate anche in campo spaziale, sono tra le applicazioni più avanzate di questo campo. Infatti, ad i requisiti di elevata densità di potenza (kW/kg) e di longevità, si uniscono particolari esigenze di sicurezza ed affidabilità.

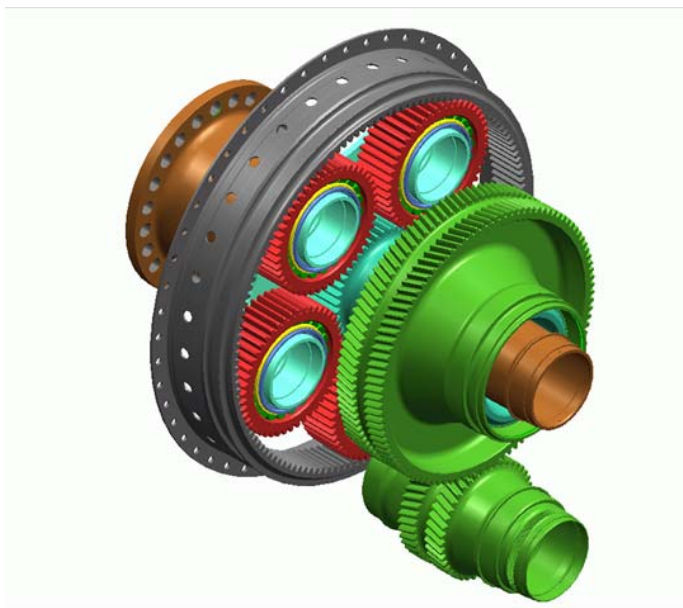
Gli sviluppi in campo motoristico, in buona parte dettati da esigenze ambientali¹, tendono a rendere più severe queste esigenze. Ad esempio, nei motori di nuova generazione del tipo *geared fan*, si prevede l'uso di riduttori molto compatti, per consentire che le velocità di rotazione sia della ventola, sia della turbina di bassa pressione del motore siano entrambe ottimali. In questi riduttori la densità di

¹ Si vedano gli obiettivi per il 2020 fissati dallo *Advisory Council for Aeronautics Research in Europe (ACARE)*

potenza è quasi di un ordine di grandezza superiore rispetto ai valori dei correnti riduttori dei motori aeronautici a turboelica. Analogamente, i periodi di impiego tra due successivi interventi di manutenzione tendono a dilatarsi.



Figura 1: Il riduttore progettato e realizzato da AVIO per il nuovo motore turboelica TP400 (8 MW di potenza: qui è mostrato sul banco prova).



Esigenze progettuali impegnative anche per quanto riguarda gli organi di trasmissione si presentano sia a causa del previsto uso di generatori elettrici di bordo aventi potenza maggiore che in passato, sia per la scelta di particolari strategie riguardo ai profili di discesa nei voli commerciali. Per fare fronte a queste esigenze, occorre tra l'altro aumentare i valori ammissibili di progetto per quanto riguarda le sollecitazioni delle dentature, andando oltre ai limiti tradizionalmente fissati da normative.

La ricerca, che qui si descrive, è stata principalmente orientata a riprodurre su un banco prova di caratteristiche avanzate, condizioni simili a quelle di esercizio e quindi esplorare il campo della fatica con cedimenti dopo numerosi cicli. Questa attività è stata svolta presso il Centro per le Ricerche su Trasmissioni Meccaniche a tecnologie avanzata (CRTM) del Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Nucleare e della Produzione dell'Università di Pisa, in collaborazione con AVIO Propulsione Aerospaziale SpA.

Si sono perciò eseguite numerose prove, finalizzate a studiare sia la rottura dei denti per fatica, sia il danneggiamento delle superfici delle dentature. Sono state usate ruote dentate costruite in due materiali ed è stata considerata – specie per il secondo tipo di danno – anche l'influenza della microgeometria delle superfici. I criteri sia per l'impostazione delle prove (già esposti in una passata Conferenza), sia per l'elaborazione statistica dei risultati, sono stati ulteriormente affinati.

Prima delle prove è stato necessario procedere alla installazione, messa a punto e collaudo del banco, che è stato appositamente costruito nel 2002 sulla base di una specifica e di un progetto concettuale elaborati da AVIO. Le prove si sono svolte nell'arco di alcuni mesi ed hanno comportato fino ad ora circa 1000 ore di esercizio del banco. Le attività di preparazione delle esperienze e di analisi sperimentale dei risultati, di cui in seguito, hanno richiesto un impiego di risorse umane e di tempo superiore a quello dedicato alle prove vere e proprie.

2. MATERIALI ED APPARECCHIATURE

Le prove sono state effettuate sul banco prova a ricircolo di potenza meccanica descritto in [1]. La massima potenza circolante è di circa 1000 kW alla velocità di rotazione di 18000 giri/min.

Le ruote dentate campione sono state realizzate ed estesamente controllate da AVIO. Esse sono costruite con due acciai da cementazione, trattati superficialmente. Uno di questi materiali è caratterizzato dalla capacità di mantenere la massima durezza fino a temperature sostanzialmente più elevate di quelle ammissibili per gli acciai da cementazione di più comune impiego.

In Fig. 2.a è mostrata una delle dentature cilindriche a denti diritti usate, come campioni, nelle prove ed in Fig. 2.b un esempio di profilo di microdurezza del fianco. Inoltre, sono stati eseguiti rilievi sia di forma, presso AVIO con apparecchiatura Zeiss, sia di rugosità superficiale, presso il DIMNP con rugosimetro Hommel T8000. Infine, sono state eseguite impronte su acetato (“repliche”) delle superfici di vari denti, per osservazioni su microscopio ottico e per confronto con analoghe impronte ottenute durante o dopo le prove.

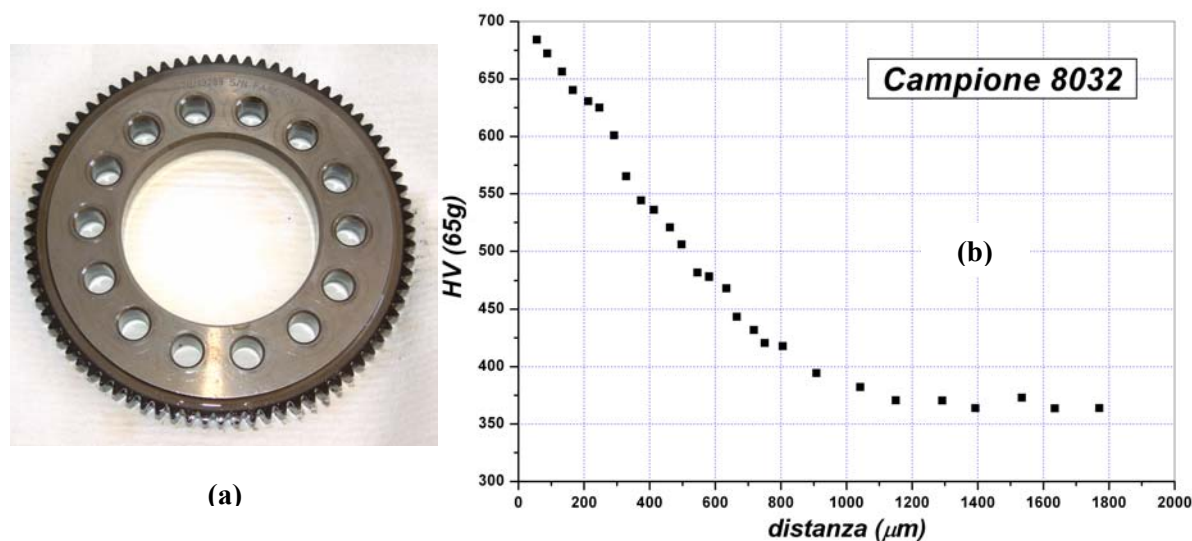


Figura 2: Dentatura campione (a) ed esempio di profilo di microdurezza (b).

Si sono utilizzate finora dentature con 80 denti ad evolvente, aventi modulo 1,75 mm, con angolo di pressione $22^{\circ}\frac{1}{2}$. La dentatura è molto precisa, corrispondente alla qualità AGMA $Q \approx 12$. La dentatura è caratterizzata da un ampio raccordo di piede (*full fillet*) ed il profilo dei fianchi è modificato sia per quanto riguarda lo smusso di testa (si è usata sia una spoglia lineare che una spoglia ad andamento parabolico) sia per la presenza o meno della bombatura.

Nelle prove destinate a caratterizzare la resistenza a danno superficiale (*compressive strength*), sono state usate due bombature di diversa entità (20 μm e 40 μm). Si è innalzata conseguentemente – a parità di carico – sia la pressione hertziana, sia, in minor misura, la sollecitazione alla base dente. La maggior parte delle prove è stata eseguita su dentature con finitura di rettifica, cui corrispondevano valori medi della rugosità R_a compresi tra 0,5 e 0,16 μm. La finitura di rettifica delle dentature bombate era migliore di quella usata nel caso delle prove di resistenza a rottura del dente (*bending fatigue strength*). In alcune prove si sono usate dentature che avevano subito un processo di superfinitura isotropica, con valori $R_a \approx 0,07$ μm.

E' stato utilizzato un lubrificante sintetico (Aeroshell Turbine Oil 500), corrispondente alla specifica MIL-PRF-23699F, avente come base estere neopentile di poliglicolo. La lubrificazione è ad iniezione d'olio con getti posizionati sul piano medio delle ruote sia in accesso che in recesso ed alimentati in modo da avere una portata di circa 4 l/min con velocità massima del getto pari a circa 23 m/s in tutte le prove. Sono state impostate e monitorate continuamente le temperature di ingresso, pari a 100°C

(prove di rottura) e 120°C (prove di danno superficiale)². In questo ultimo caso la viscosità del lubrificante era di circa 3,4 mPa s. Sono state monitorate anche le temperature in varie zone critiche.

Si è utilizzata la strumentazione descritta in [1, 2], recentemente potenziata per mezzo di software e di dispositivi dedicati all'elaborazione dei dati accelerometrici. Quattro accelerometri ad alta frequenza sono stati posizionati sulle sedi dei cuscinetti della sezione di prova del banco, orientandoli sia lungo la direzione della retta d'azione delle dentature sia perpendicolarmente a questa. Altri accelerometri erano sistemati in alcuni punti del banco. La misura di coppia è stata eseguita in telemetria, tramite uno speciale torsionmetro per applicazioni ad alta velocità di rotazione, mentre la velocità stessa è fornita da un encoder montato sul motore principale.

3. PROVE EFFETTUATE

Due ruote dentate campione nominalmente identiche (vedi Fig. 2.a) sono fatte ingranare tra loro con dati valori di coppia e di velocità di rotazione. Il banco prova, già descritto in [1], ha un rapporto di ingranamento unitario e le dentature sono state realizzate e contrassegnate in modo tale da garantire che durante le prove il montaggio sugli alberini del banco fosse sempre lo stesso e che ogni dente ingranasse sempre con lo stesso dente della ruota contrapposta. In tal modo ogni coppia di denti ingrananti tra loro è concettualmente assimilabile ad un provino. Ad ogni giro, 80 di questi ideali provini subiscono perciò un ciclo di sollecitazione. Data la qualità della lavorazione, la variabilità delle condizioni di ingranamento tra dente e dente non sono maggiori di quella comunemente osservata nel sollecitare i classici campioni da laboratorio durante le prove di fatica. Ciò è confermato da calcoli effettuati, come detto in seguito, con profili di dentature effettivi.

A differenza del caso delle prove di resistenza dei denti a fatica, nelle prove di danneggiamento superficiale le dentature campione sono state sollecitate dapprima su un fianco e poi sul fianco opposto. Le due prove suddette sono state eseguite a velocità periferica differente, l'una a circa 50 m/s l'altra a circa 100 m/s. Si tenga presente che nella normativa AGMA, ad esempio, sono fornite informazioni circa il parametro K_v per velocità periferiche non superiori a 50 m/s. Tutti i regimi di prova sono preventivamente selezionati in modo tale che la risposta vibratoria del banco non dia origine a disturbi significativi.

Come si è detto in precedenza, si sono usate varie finiture superficiali nelle prove di danno superficiale, usando dentature bombate. Nel progetto dei campioni di prova è stato considerato il fenomeno della lubrificazione elastoidrodinamica (EHD), e calcolato il valore del parametro:

$$\Lambda = \frac{h_0}{\sqrt{R_{q1}^2 + R_{q2}^2}}$$

ove h_0 è l'altezza del meato EHD e $R_{q,i}$ sono le rugosità quadratiche medie dei fianchi dei denti. Le condizioni tribologiche risultavano essere alquanto più favorevoli proprio nel caso della bombatura più marcata, ove la finitura per rettifica era migliore o vi era superfinitura, nonostante il maggiore valore della pressione hertziana.

Le prove sono state effettuate con velocità e carico mantenuti costanti, dopo una breve fase di rodaggio. Nelle prove di resistenza a fatica le prove senza rotture si sono protratte fino a 10^7 cicli. Nelle prove di danneggiamento superficiale sono state condotte anche varie prove esplorative. In questi casi il carico è stato incrementato progressivamente, mantenendolo invariato per almeno $5 \cdot 10^6$ cicli. Alcune prove si sono prolungate fino ad accumulare $6 \cdot 10^7$ cicli al massimo carico.

² Il sistema di prova consente di raggiungere, se necessario, temperature di ingresso di 180°C.

I criteri per l'identificazione dell'avvenuto danneggiamento superficiale erano i seguenti:

- *micropitting*: estensione dell'area danneggiata (con microcrateri tipicamente di 20 μm) di dimensioni in pianta $> 1 \text{ mm}^2$ su almeno il 20% dei denti di almeno una ruota (Fig. 3.a);
- *pitting*: estensione dell'area danneggiata (con crateri macroscopici o distacco di scaglie ovvero *spalling*) di dimensioni in pianta $> 1 \text{ mm}^2$ su almeno un dente di almeno una ruota (Fig. 3.b);
- *bending failure*: rottura di uno o più denti (Fig. 3.c).

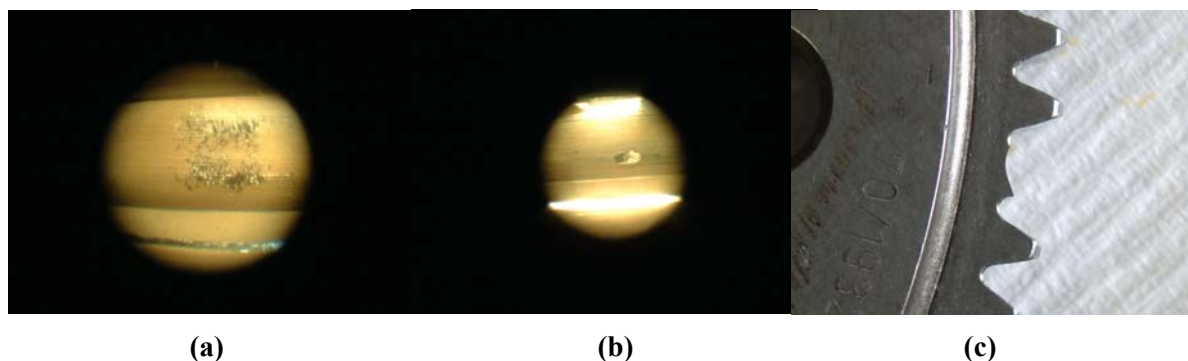


Figura 3: Tipologie di deterioramento superficiale osservate tramite boroscopio (a, b) e rottura di un dente per fatica (c).

Le indagini condotte dopo le prove sono state particolarmente laboriose nei casi di deterioramento superficiale. Sono state infatti rilevate le alterazioni superficiali non solo tramite rugosimetria (Fig. 4.a) ma anche tramite microscopia SEM sia delle superfici (Fig. 4.b) che delle sezioni di alcuni denti.

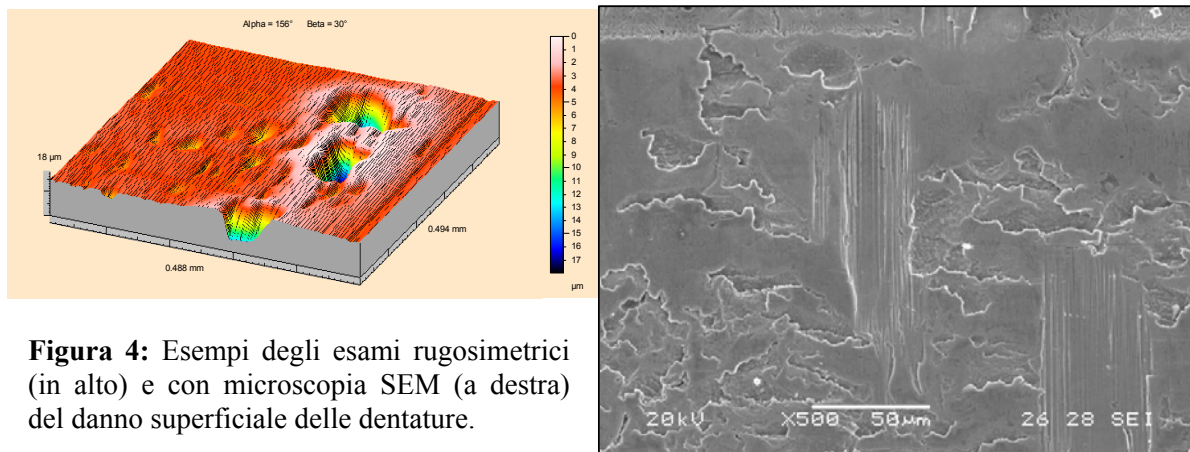


Figura 4: Esempi degli esami rugosimetrici (in alto) e con microscopia SEM (a destra) del danno superficiale delle dentature.

4. ANALISI DELLE CONDIZIONI DI PROVA

Le procedure tradizionali di calcolo, espone nelle normative e rese facilmente accessibili tramite software, sono tuttora un aspetto fondamentale della progettazione. In primo luogo, i valori della sollecitazione delle dentature durante la prova sono stati perciò calcolati tramite questi strumenti.

Un'analisi assai più efficace si ottiene tramite la modellazione dello ingranamento sotto carico (*Loaded Tooth Contact Analysis, LTCA*), che oggi si può eseguire tramite strumenti software commerciali adeguatamente convalidati, quali i programmi della serie Calyx[®]. In questi programmi, la

deformazione del corpo del dente e della ruota (e se necessario di altri organi adiacenti) è calcolata tramite una modellazione agli Elementi Finiti relativamente semplice, mentre il fenomeno del contatto è corrispondentemente gestito per via analitica [3]. Grazie a questo approccio ibrido, il programma Helical 3D[®], qui utilizzato in modalità cineto-statica, consente di analizzare l'ingranamento delle dentature campione con tempi di calcolo decisamente brevi.

Si sono perciò determinate, per ogni condizione di prova, sia le pressioni di contatto tra le superfici dei denti in presa, supposte lisce e senza attrito, sia le tensioni (in particolare: alla base del dente), sia l'errore di trasmissione presente con date geometrie e carichi. In figura 5 è mostrato un esempio dei risultati ottenuti: l'effetto del carico sul grado di ricoprimento e l'influenza delle modifiche di profilo, (qui dell'ordine di $20 \div 40 \mu\text{m}$) possono essere determinati con relativa accuratezza.

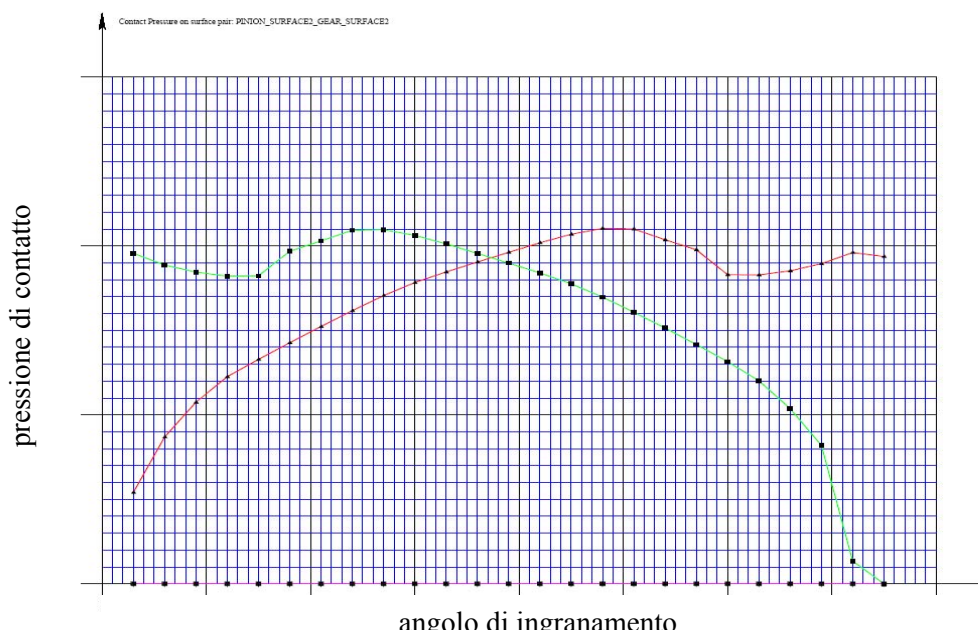


Figura 5: Andamento calcolato della pressione di contatto in accesso e recesso durante una prova.

Per tenere conto degli effetti dinamici, minimizzati sia tramite la costruzione molto precisa delle dentature, sia tramite l'opportuna scelta dei regimi di prova, si sono maggiorati i risultati del calcolo di tensioni e pressioni, tramite un fattore K_v , e, rispettivamente, $(K_v)^{0,5}$, estrapolato dalla normativa.

Le condizioni tribologiche di contatto sono state analizzate determinando per prima cosa, come detto sopra il valore del parametro Λ . A tale scopo è stato utilizzato il nuovo programma di calcolo ENGEN, sviluppato presso l'Università di Pisa dai Proff. Bassani, Ciulli e Piccigallo e dai loro collaboratori [4] I risultati di questo codice sono stati confrontati, con ottimi risultati, con quelli forniti dalla letteratura per alcuni casi semplici (es.: dentature senza bombatura). Tale software è basato su un modello della termo-piezo-viscosità del lubrificante, che per tale motivo ha dovuto essere caratterizzato sperimentalmente. Tramite questo programma di calcolo sono state determinate le temperature di flash secondo Blok. E' stato perciò possibile quantificare l'indice di rischio per il fenomeno del grippaggio tra i denti (*scuffing*) nelle varie condizioni di prova.

E' stato inoltre utilizzato il modello proposto in [5] per la previsione del rischio di microvaiolatura (*micropitting*). Questo modello considera sia la rugosità iniziale dei fianchi dei denti, (qui determinata sperimentalmente), sia la sua modifica nelle fasi iniziali del funzionamento tramite la plasticizzazione delle creste più elevate. Si calcola infine l'affaticamento locale delle superfici, per determinare, anche in base alle caratteristiche convenzionali di fatica del materiale, un indice di rischio relativo alla comparsa dei caratteristici microcrateri.

5. RISULTATI

Non è possibile, anche per motivi di riservatezza industriale, riportare qui i risultati ottenuti nel corso di queste prove. Ci si limita, pertanto, ad alcuni commenti.

Per quanto riguarda la resistenza alla rottura dei denti per fatica è confermata la fondamentale importanza delle tensioni residue (di compressione) generate dal processo tecnologico. Unitamente alla grande durezza superficiale (Fig. 1.b) esse garantiscono eccezionali valori di resistenza delle dentature. Tuttavia, il maneggio di queste dentature è delicato, potendo determinare il fenomeno detto di *chipping* (distacco di scaglie da spigoli vivi di parti in coazione). Ciò può dare luogo a rotture anomale, effettivamente osservate, non prevedibili con il tradizionale calcolo della tensione alla base del dente. Altrettanto dicasi per le rotture indotte da precedenti gravi forme di danno superficiale: è un aspetto che si intende investigare, anche sperimentalmente, in un prossimo futuro.

E' stata confermata l'importanza delle condizioni tribologiche nel determinare la tipologia del danneggiamento. Ad esempio, le forme di danno superficiale relativamente diffuse, mostrate in Fig. 3.a, si sono osservate su uno dei materiali nelle prove a velocità più elevata, dopo circa $4 \cdot 10^6$ cicli a massimo carico. Alla velocità inferiore, dopo circa $6 \cdot 10^6$ cicli a massimo carico, si è manifestato invece un deterioramento più localizzato, riguardante pochi denti (Fig. 3.b). Esami SEM hanno tuttavia mostrato che queste ultime forme di danno, pur manifestandosi con fessurazioni superficiali ed (in alcuni casi) anche sub superficiali, sono più complesse del semplice caso di *pitting*. Si notino infatti le striature nella immagine SEM in Fig. 4. Questi aspetti sono esaminati, in rapporto ai risultati delle analisi rugosimetriche e frattografiche, in [6]. Ulteriori esami sperimentali, relativi anche alla microstruttura degli strati superficiali del materiale, sono attualmente in corso.

Appare anche necessario approfondire lo studio del problema del *micropitting*. L'applicazione del semplice modello riportato in [5], pur abbastanza consistente con i risultati ottenuti, richiede infatti una taratura empirica. Modelli più complessi, ad esempio basati sulla lubrificazione micro-elastoidrodinamica tra superfici rugose, sono di difficile applicazione pratica.

6. CONCLUSIONI

L'attività sperimentale che qui si è riassunta si è estesa per vari mesi ed ha permesso di raccogliere una mole di dati notevole. Questi dati sono stati immediatamente utili ad AVIO per la progettazione di nuovi ingranaggi (tra cui il riduttore in Fig. 1), le cui dimensioni hanno potuto essere ridotte, a parità di prestazioni, di circa il 25% rispetto ai precedenti. Ciò è dovuto in primo luogo alle nuove metodologie di progetto, basate sulle sollecitazioni effettive, ed in secondo luogo all'aumento dei valori ammissibili delle sollecitazioni stesse, reso possibile anche da questo programma di prove.

I prossimi programmi di ricerca, già iniziati, hanno i seguenti obiettivi.

- a. Studiare sperimentalmente il fenomeno del grippaggio a caldo (*scuffing*), anche al fine di convalidare un nuovo approccio sviluppato presso l'Università di Pisa (si veda [4]). Sono state già eseguite a tal fine alcune prove, nelle quali si sono simulate le condizioni di emergenza dovute a temporanee sospensioni della lubrificazione.
- b. Sviluppare un approccio diagnostico ed, in prospettiva, prognostico, grazie a nuovi algoritmi elaborati in collaborazione con il Dipartimento di Matematica Applicata "U. Dini" dell'Ateneo pisano.

I numerosi risultati già raccolti, che formano l'oggetto di questo lavoro, richiedono tuttavia una ulteriore elaborazione e, presumibilmente, alcune prove mirate, allo scopo di approfondire alcuni aspetti già evidenti o di farne emergere altri necessari per la conferma dei modelli di calcolo.

BIBLIOGRAFIA

- [1] 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
- [2] Amorena M. *et al.*, “Controllo e diagnostica di un sistema di prova ingranaggi per applicazioni aeronautiche”, Atti del XXXII Congresso AIAS, Salerno 3-6 Settembre 2003
- [3] Vijayakar S., “A Combined Surface Integral and Finite Element Solution for a Three Dimensional Contact Problem”, Int. J. of Numerical Methods in Engineering, vol.31, 1991, pp. 525-545
- [4] Bassani R., Ciulli E., Facchin M., Polacco A., Pugliese G., “New perspectives in scuffing”, Proc. 4th AIMETA Int. Tribology Conference, Roma 14-17 Settembre 2004
- [5] Antoine M., Besson G.F., “Simplified modellization of gear micropitting”, Proc. Inst. Mech. Engrs., Vol.216, Part. G, 2002, pp. 291-302
- [6] Bassani R., Ciulli E., Manfredi E., Manconi S., Polacco A., Pugliese G., “Experimental study on wear and fracture in aeronautical gear transmissions”, Proc. 8th Biennial Conf. on Engineering Systems Design and Analysis (ESDA06), Torino 4-7 Luglio 2006