



NICO LO' REGGIO
Socio AIPAM

Rotture di fatica nei macchinari di bordo

In questo articolo si parla di avarie che sempre più frequentemente si manifestano e sono oggetto di accertamenti in quanto portano, talvolta, a danni importanti sia in punto tecnico sia in termini economici.

Le rotture di fatica di organi di macchina, quindi, in questa trattazione, di componenti metallici, sono manifestazioni che possono risultare catastrofiche perché, nella maggior parte dei casi, non sono direttamente osservabili se non riconosciute con prontezza dai sistemi di monitoraggio dei parametri di funzionamento della macchina in questione così da arrestare prontamente l'impianto.

L'attuale teoria della meccanica dice che una *crina* (lesione) di *fatica* (per stati di tensione alternata oppure pulsante) si attiva entro 10^7 cicli (dieci milioni di cicli) di funzionamento del componente, ferma restando la necessità che sia presente (ovvero che si sia formato nel tempo) un punto di innesco di una *microcrina* iniziale nel materiale di costruzione del componente stesso. Tuttavia l'attuale più ragionevole termine assunto dai grandi costruttori di macchine rotanti, che deriva da approfondimenti conoscitivi nel campo della cosiddetta "**Ultra-High Cycle Fatigue**", fissa in 10^8 cicli (cento milioni di cicli) - e anche oltre - di funzionamento del componente (vedasi diversi studi che hanno per oggetto queste analisi dovute proprio all'apparire di lesioni di fatica su numeri di cicli molto elevati) ai fini dell'attivazione del processo.

Esami di laboratorio, recentemente condotti sul materiale di costruzione di un componente primario di una macchina, mostrano un comportamento decrescente del valore della tensione ("S-stress") nel diagramma S-N per numero di cicli N oltre 10^7 , diversamente da quanto comunemente assunto con S costante entro il valore di 10^7 cicli.

Due semplici esempi per meglio comprendere gli ordini di grandezza del numero di cicli di componenti meccanici delle costruzioni navali:

1. per un'elica a 5 pale (carichi pulsanti) che ruota a 120 giri al minuto si parla, piuttosto chiaramente, di 600 cicli al minuto per ogni organo meccanico collegato all'elica stessa, quindi il potenziale innesco di una rottura di fatica potrebbe avvenire dopo 2.778 ore di moto, da inizio vita;
2. per un albero a manovelle (carichi alternati) di un motore a 7 cilindri che sia in



La frattura di fatica su una maschetta di un albero a manovelle (diametro del perno di piede di Biella 415 mm)

The fatigue crack issue is here briefly examined from its theoretical point of view down to the actual available technologies that might be accessible to evaluate a reasonable operational risk of metallic or composite mechanical components.

Given that a fatigue crack develops from a stress concentration triggering point, either a defect in the material or in the geometry, its early detection is of paramount relevance.

Superficial defects are usually observed by the magnetic particle examination, while the Total Focusing Method (TFM) is the only actual option in the ultrasonic analysis.

However the TFM limitation in analyzing existing components, specially when they are in full service, is the depth of the proper return signal detecting the size of internal defects and/or cracks.

Nowadays various studies have been published on the subject of the ultra-high cycle fatigue fixing in 10^8 cycles the limit to be considered for mechanical components. Recent lab tests conducted on a major engine component show a decreasing value of the stress (in the S-N diagram) for numbers of cycles N above 10^7 , the commonly considered limit for the S value to remain constant.

esercizio a 500 giri al minuto (questo per rendere più accessibile la comprensione degli ordini di grandezza in gioco), significa 3.500 cicli al minuto, ovvero 210.000 cicli all'ora, quindi il potenziale innesco di una rottura di fatica potrebbe avvenire dopo 476 ore di moto, da organo nuovo.

Ma, ripeto, in presenza di un innesco che altro non è se non un punto di concentrazione delle tensioni dal quale si attiva una *microcrina*.

Deve essere oltretutto sottolineato che ciascuno dei summenzionati componenti ha risposte vibrazionali torsionali proprie che modificano le sue condizioni operative, quindi prospettandosi possibili diversi inneschi.

La *crina di fatica*, una volta partita, si allarga a raggiera dal punto d'innesco e il suo avanzamento non ha velocità prestabilite e riconoscibili, ma possono essere osservati (a posteriori, dall'esame della superficie del materiale dopo la rottura) i segni del suo momentaneo arresto quando quell'organo di macchina sia fermo: si possono quindi notare molto frequentemente i cosiddetti "*beach marks*" rappresentativi del momentaneo arresto del fronte di avanzamento della *crina di fatica*.

La *crina di fatica* avanza quindi nel tempo fi-



Difetto interno del materiale e possibile punto di innesco della frattura per concentrazione delle tensioni su una cuspid



Rottura di fatica in corrispondenza del primo filetto di un raccordo di un componente di macchina

no al punto di perdita di resistenza della sezione dell'organo di macchina soggetta a crina; a quel punto la sezione (quindi l'organo di macchina) subirà un catastrofico cedimento di schianto. Dall'esame della superficie della sezione di rottura del componente si possono ben distinguere le due rotture con morfologia ben diversa. Rilevante, per quanto detto sopra, la presenza di punti d'innesco che possono essere di diversa tipologia: più comunemente si tratta di difetti del materiale di costruzione oppure di geometria, ma solamente osservabili con analisi al microscopio a scansione elettronica (SEM), quindi scoprendo difetti con ordini di grandezza dei micron (millesimi di millimetro). In sostanza la concentrazione di tensioni intorno al difetto (in corrispondenza dello stesso) è all'origine del processo d'innesco della rottura di fatica: la presenza di *micro difetti* può generare *macro rotture*. Ovvero per comprendere le *macro avarie* sovente bisogna andare a cercare *micro difetti* esistenti, rilevabili o meno che fossero in origine.



I cosiddetti "beach marks" sulla superficie di una lesione di fatica di un componente di macchina

Una prima considerazione da farsi è che l'attivazione di una *crina di fatica*, in qualunque stadio di avanzamento essa sia osservata, comporta comunque la condanna del componente, cioè la sua perdita totale costruttiva, comportandone, quindi, la sostituzione.

L'altra considerazione, assai critica invero, è come poter monitorare un macchinario affinché la formazione di una rottura di fatica in un suo organo non possa generare effetti collaterali devastanti, come, purtroppo, oggi si osservano.

Quali possono quindi essere i sistemi di monitoraggio per evitare effetti devastanti?

Quali tecnologie (non distruttive) possono oggi permettere una valutazione precoce dell'assenza di microcrine ovvero di punti innesco, quindi di "salute" strutturale del componente?

Detto che le *microcrine* (nei metalli, a livello superficiale) si rilevano otticamente mediante liquidi penetranti oppure mediante il test detto "**magnaflux**", quelle interne al materiale possono essere rilevate solo tramite indagine agli ultrasuoni, con diverse limitazioni dovute alla scarsa penetrazione in profondità del segnale, oltre alla necessità di dare buon spazio al trasduttore.

Tecnicamente, per questa tecnologia, si parla di **Total Focusing Method (TFM)**, ovvero di un algoritmo che trasforma in immagini i dati acquisiti in modalità **Full Matrix Capture (FCM)** da una

sonda che trasmette onde ultrasoniche e riceve i segnali di ritorno tali da individuare anomalie in profondità, valida anche per materiali compositi e componenti meccanici in generale, laddove vi sia la necessità di valutarne le condizioni operative ai fini di una ragionevole valutazione dei rischi associati all'esercizio dello strumento (del sistema, del macchinario) che comprende i suddetti componenti.

Il **TFM**, sostanzialmente, consegna una fotografia del materiale (tipo una TAC ospedaliera) con ottima precisione e cura del dettaglio di ogni eventuale difetto interno presente (che, per esempio, può essere un vuoto oppure un'inclusione), ma fino a una profondità, per l'acciaio, nell'ordine dei 45 mm, come consente oggi la tecnologia disponibile con accesso diretto al componente in esame; ciò per evitare falsi segnali di ritorno sulla sonda, quindi errori di identificazione del possibile difetto.

Questo allo stato attuale della conoscenza.#