

M.R.I.: Gomma magnetica per la ricerca di difetti dei materiali magnetici

M. Canali, * G. Eusebio, * M. Cevenini **

* Aeronautica Macchi, Varese

** NDT Italiana, Milano

Viene illustrato un nuovo metodo per la ricerca di cricche e altri difetti nei materiali magnetici. Questo metodo consiste in una soluzione colabile a base gomma siliconica antiadesiva, contenente polveri ferromagnetiche finemente disperse, che sotto l'influsso di un campo magnetico migrano all'interno della massa gommosa concentrandosi in corrispondenza dei difetti. Si ottiene in questo modo, dopo indurimento, una replica della superficie esaminata, che visualizza il grado di finitura della superficie, nonché le dimensioni e la forma del difetto.

Il campo tipico di applicazione è il controllo di zone difficilmente accessibili con i metodi tradizionali, come: fori piccoli, filettature, raggi di raccordi interni, difetti dimensionali, controlli e documentazioni della rugosità superficiale, ecc.

Viene portato un esempio di applicazione pratica del metodo M.R.I. che consiste nella ricerca di cricche dovute a fatica in un particolare di costruzione aeronautica, e nello studio della loro propagazione.

Procedimento

E' stata sviluppata una nuova tecnica di controllo non distruttivo per individuare incrinature ed altri difetti superficiali e sottopelle in materiali ferromagnetici.

Questo procedimento chiamato Ispezione con Gomma Magnetica (Magnetic Rubber Inspection = M.R.I.), è stato studiato per estendere le possibilità delle procedure NDT già esistenti (in primo luogo le ispezioni con polveri magnetiche) in posizioni problematiche. Queste comprendono: aree con limitata accessibilità visuale, superfici rivestite, parti aventi geometrie complesse o cattive condizioni superficiali, ricerca di difetti che richiedono la massima sensibilità perchè si possano reperire ed interpretare.

Il metodo M.R.I. consiste nell'uso di polveri magnetiche disperse in gomma polimerizzabile a temperatura ambiente. Questo materiale è catalizzato, applicato alla superficie in esame e magnetizzato, provocando la migrazione delle particelle attraverso la gomma ed il loro addensamento in corrispondenza dei difetti.

A polimerizzazione avvenuta, si rimuove dalla parte in esame la gomma induritasi e si cerca la presenza di difetti, indicati dall'accumularsi delle particelle magnetiche. Il risultato è una traccia nera che ripete l'andamento del difetto e che contrasta col sottofondo grigio della gomma.

Come materiale base è stata scelta per varie ragioni la gomma ai siliconi: si adatta perfettamente alle superfici da esaminare formandone un'esatta replica, una volta induritasi viene facilmente rimossa dalle parti ed inoltre indurisce rapidamente a temperatura ambiente. Come mezzo rivelatore sono state usate speciali polveri magnetiche nere in rapporto del 2%.

La selezione del sistema catalizzatore costituisce la parte principale del procedimento M.R.I. Se il materiale si polimerizza troppo rapidamente, la migrazione delle particelle magnetiche verso il difetto potrebbe essere

fermata prima del tempo; se la polimerizzazione è troppo lenta, il periodo per completare l'ispezione risulta troppo lungo.

Il tempo ideale di migrazione delle particelle dipende oltre che dalla geometria della parte da esaminare, dalle caratteristiche di umidità e temperatura dell'ambiente in cui si lavora. Per ottenere la massima versatilità del metodo, si sono sviluppati tre sistemi di catalizzazione:

tipo di sistema	tempo di migrazione delle particelle	tempo di indurimento
media rapidità	8 minuti	1 ora
normale	20 minuti	da 2 a 3 ore
migrazione lenta	60 minuti	da 4 a 8 ore

Il procedimento M.R.I. si può dividere in tre parti:

1. Preparazione pre-ispettiva delle parti
2. Aggiunta del catalizzatore e magnetizzazione
3. Esame delle repliche induritesi.

La pre-ispezione consiste nel pulire la parte dal grasso o da altre sostanze contaminanti. Non è indispensabile eliminare la verniciatura o rivestimenti galvanici o metallici, benchè la rimozione dei detti rivestimenti spesso può migliorare le indicazioni magnetiche.

La gomma magnetica liquida deve essere accuratamente mescolata prima dell'uso per garantire una dispersione omogenea delle polveri magnetiche.

Basandosi sulla tabella precedentemente citata, si sceglie il metodo di catalizzazione.

Una determinata quantità di catalizzatore viene miscelata alla gomma ed il tutto viene versato sulla parte da esaminare. La magnetizzazione può essere fornita da un magnete permanente, da corrente continua fatta passare attraverso la parte direttamente o per mezzo

di una bobina, oppure con un giogo elettromagnetico a corrente continua.

E' consigliabile l'uso di un gaussmetro per controllare la densità del flusso magnetico, in modo da garantire la ripetibilità dei risultati.

Poichè le particelle magnetiche nella sospensione debbono migrare attraverso la gomma, la durata di magnetizzazione è più lunga che nel metodo tradizionale con polveri magnetiche.

Le densità di flusso richieste sono di 20 Gauss (0,002 tesla) o più; naturalmente maggiore sarà il flusso, minore la durata richiesta.

L'optimum del tempo di magnetizzazione varia a seconda degli scopi dell'ispezione stessa. Si danno qui di seguito alcuni esempi:

tipo di area da ispezionare	densità di flusso in Gauss	durata della magnetizzazione
fori passanti	da 25 a 100	30 secondi
superfici	200	30 secondi
superfici	100	3 minuti
superfici (con magnetizzazione residua)	20	30 minuti
superfici rivestite	da 100 a 200	da 3 a 10 minuti
parti filettate (con magneti permanente)	da 20 a 50	8 minuti

Come per i normali metodi magnetici, anche la M.R.I. richiede la magnetizzazione in croce per il reperimento di tutti i difetti.

A polimerizzazione terminata, la replica indurita viene esaminata con un microscopio a basso ingrandimento (da 7 a 15 X), con forte illuminazione. Cricche, porosità ed altri difetti verranno indicati da linee nere, inoltre si otterrà un calco preciso dei difetti dimensionali e della finitura superficiale (fig. 1).

La procedura completa è descritta nelle Specifiche Militari USA MIL-I-83387 Agosto 1972.

I casi tipici di impiego della M.R.I. sono l'ispezione di fori e di superfici interne di componenti tubolari. Fori di piccolo diametro, specie se filettati, sono mol-

to difficili da ispezionare con i metodi tradizionali: più piccolo è il diametro e più profondo è il foro, maggiori sono le difficoltà.

I metodi a liquidi penetranti ed a polveri magnetiche dipendono essenzialmente dalla accessibilità visuale della parte; d'altro canto radicali variazioni di sezione, scanalature ecc. pongono grosse limitazioni all'uso di ultrasuoni e raggi X, nel controllo di superfici interne. La M.R.I. è stata con successo impiegata nel controllo di fori ciechi, passanti e filettati di diametro compreso fra 3 e 20 mm (fig. 2).

La M.R.I. può essere usata per studiare la formazione e la propagazione dei difetti nel corso di studi, progettazione di particolari soggetti a fatica, prove di durata, fornendo una tangibile documentazione delle prove eseguite, che può essere esaminata anche in luoghi diversi da quello dell'ispezione e può quindi essere conservata indefinitamente (fig. 3).

La M.R.I. dà inoltre la possibilità di esaminare al microscopio la replica indurita. Questo permette la rilevazione di difetti con dimensioni dell'ordine di 0,05-0,125 mm di lunghezza; profondità circa il 40% della lunghezza; larghezza 1,25-7,5 μ , su superfici con rugosità di 125 RMS o minore.

La ricerca dei difetti può essere fatta anche se il pezzo è verniciato o cromato: il tempo prolungato di magnetizzazione compensa la minor sensibilità (fig. 4).

Grazie alle caratteristiche uniche della gomma silicatica, la M.R.I. oltre che alla ricerca di difetti in materiali ferromagnetici, ben si presta al controllo dimensionale, delle condizioni superficiali e della qualità della lavorazione meccanica, su ogni tipo di materiale.

Premessa alla ricerca

Il nostro lavoro con la M.R.I. è iniziato al momento di impostare un ciclo di prove di fatica su un particolare in acciaio tipo 40 Ni Cr Mo 7 bonificato ad una resistenza di 120 ÷ 135 kg/mm². La zona interessata al controllo è una serie di fori per ribattini di \varnothing 4,85 mm praticati in una costola dello spessore di 6 mm, per fissare un angolare di supporto in lega leggera.

La posizione di questo particolare nel complessivo è tale da renderlo difficilmente accessibile, sia nella struttura, di prova che montato sul velivolo.

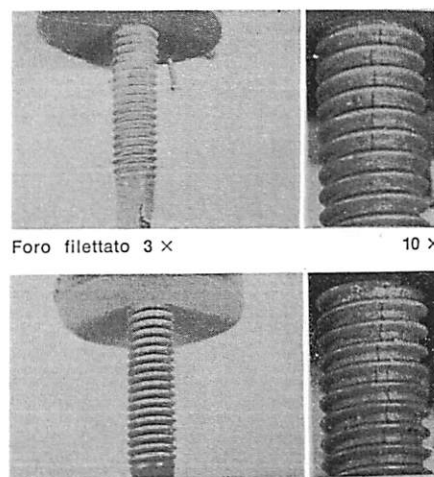
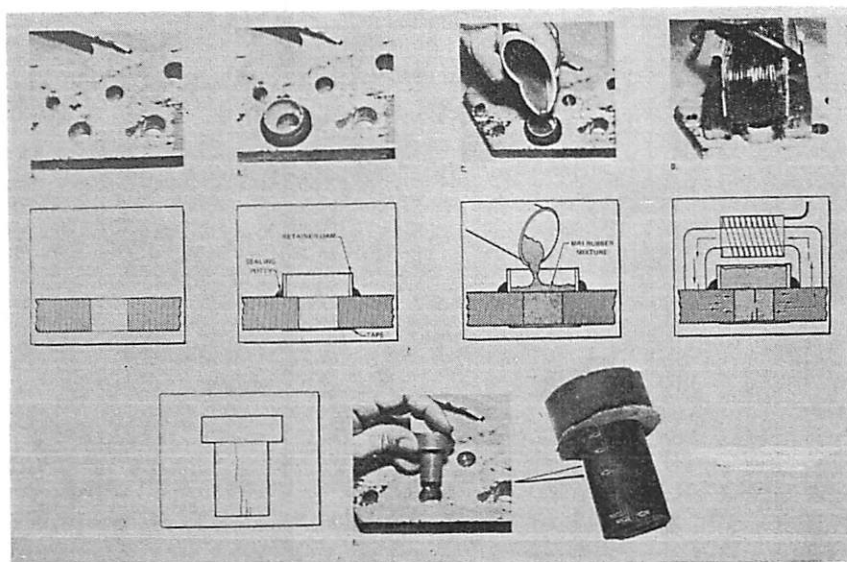


Fig. 2 - Impiego del processo MRI per fori filettati.

Fig. 1 - Procedimento MRI.

La scelta del metodo

Il piano di lavoro prevedeva lo studio della formazione e dell'avanzamento delle cricche sulla superficie dei fori, che sono situati in una zona ad alta sollecitazione, e la messa a punto di un piano di controllo da effettuare durante le revisioni periodiche del velivolo, allo scopo di conoscere le condizioni effettive del pezzo durante la sua vita.

Alla luce di questi dati di partenza abbiamo preso in considerazione i vari tipi di controllo non distruttivo di uso più corrente, per valutarne l'idoneità ad essere impiegati nel nostro caso: si trattava quindi di scegliere un metodo che assicurasse una buona sensibilità, ma che fosse contemporaneamente tanto pratico e semplice da essere impiegato anche al di fuori da un laboratorio, da personale anche non specializzato, come può capitare sui campi di volo.

La selezione è stata fatta tra i seguenti metodi:

1. esame metalloscopico: non idoneo perchè avrebbe reso necessario lo smontaggio del pezzo.

2. esame mediante liquidi penetranti fluorescenti: non idoneo per lo stesso motivo di cui sopra. Per questi due metodi sarebbe anche esistito il problema di come misurare la lunghezza della cricca, cosa molto difficile date le dimensioni del foro.

3. esame radiografico: non idoneo, sia perchè di poca pratica applicazione, sia perchè non sarebbe stato in grado di rilevare le cricche: queste infatti hanno una larghezza insufficiente per essere individuate. Inoltre idealmente il fascio X dovrebbe giacere sullo stesso piano della cricca, cosa non realizzabile in questo caso. Infine l'esame radiografico non può trovare pratica applicazione sul velivolo data la scarsa accessibilità.

4. esame mediante correnti parassite (Eddy currents): questo metodo non ci ha dato risultati attendibili a causa delle dimensioni del foro: nelle nostre condizioni, la difficoltà di adattare la sonda e l'influenza dell'effetto bordo si sono rivelate di tale importanza che i risultati variavano al variare dell'operatore e della taratura dello strumento: per questo non lo abbiamo preso in considerazione.

5. esame con ultrasuoni: a questo metodo sono state dedicate molte attenzioni in quanto sembrava, in prima analisi, il più pratico e adatto allo scopo.

Ci si è accorti però, dopo molte prove comparative, eseguite impiegando apparecchi e campioni diversi, che date le condizioni abbastanza particolari in cui si lavorava, i risultati dipendevano in buona parte dal-



Prima del test
La replica del
foro mostra
segni di bloccag-
gio dell'utensile

Dopo 3500 cicli
Intensificazione
della precedente
indicazione e
formazione di
un'altra cricca

Dopo 4000 cicli
Le indicazioni
si uniscono e
la crescita del
difetto si evi-
denzia

Dopo 4500 cicli
La replica ri-
vela completa-
mente la cricca
da fatica. La
rottura è avve-
nuta dopo altri
45 cicli

Fig. 3 - MRI segnala l'evoluzione di una cricca durante una prova a fatica.

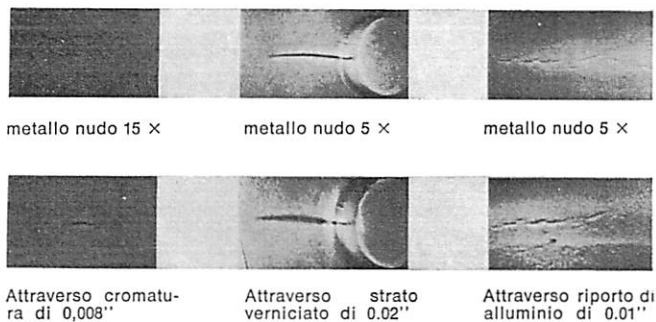


Fig. 4 - MRI attraverso tipi diversi di rivestimenti superficiali.

l'abilità dell'operatore, e che anche nelle migliori condizioni avremmo potuto stabilire con certezza soltanto l'esistenza di cricche di profondità non inferiore a 1,5 mm.

Eseguendo poi delle prove su campioni analoghi al pezzo in esame, con cricche di dimensioni e posizioni note, l'indicazione non risultava mai univoca, ed era sempre condizionata al modo di operare, per cui non abbiamo ritenuto opportuno affidarci a questo metodo.

6. esame con liquidi penetranti colorati: con questo metodo, rapido e di semplice esecuzione, si sono ottenuti risultati soddisfacenti dal punto di vista qualitativo, ma ci siamo accorti che nell'intercapedine tra la costa e l'angolare restava intrappolata una notevole quantità di penetrante, che veniva evidenziato dal rivelatore, mascherando e confondendo le indicazioni relative alla cricca. Inoltre era difficile cogliere la cricca fin dal suo inizio. Visti i risultati di questa analisi, nessuno dei metodi esaminati ha pienamente soddisfatto tutti i requisiti richiesti, e proseguendo nelle ricerche di un metodo affidabile abbiamo trovato appunto la M.R.I.

La M.R.I.

Durante le prove preliminari eseguite per acquisire la pratica necessaria per l'esecuzione e per l'interpretazione dei risultati, abbiamo notato che per una buona riuscita dell'esame era necessario porre particolare cura nelle seguenti operazioni:

1. pulizia della zona da controllare, per evitare la possibilità di avere indicazioni fasulle.

2. agitazione con mescolatore della gomma base, per ottenere un'omogenea dispersione delle particelle magnetiche.

3. colata: almeno nel nostro caso in cui l'asse dei fori è orizzontale. Questo perchè bisogna evitare la formazione di bolle d'aria, che si accumulerebbero nella parte più alta delle repliche rendendola illeggibile. Una corretta esecuzione delle prove mette in risalto i molteplici pregi della M.R.I.: primo tra tutti, nel nostro caso specifico, il fatto che la replica così ottenuta è un documento di prova che si può conservare facilmente e con il quale si può ricostruire passo per passo la vita del particolare in esame.

Per i nostri fini si è anche rivelato positivo il fatto che le repliche sono facilmente riproducibili in fotografia agli ingrandimenti desiderati, il che ci ha consentito di lavorare in condizioni molto più comode che non studiando la replica con la lente o all'ingranditore.

La prova di fatica

Finito il periodo di messa a punto del metodo con piena soddisfazione, abbiamo iniziato la prova di fatica, eseguendo il controllo a intervalli di tempo prefissati, a partire dal momento in cui si riteneva probabile la formazione della prima cricca. Estrapolando i risultati che man mano venivano ottenuti, siamo riusciti a prevedere con buona approssimazione il tempo intercorrente tra l'inizio della cricca e il momento in cui questa è risultata interessare tutta la lunghezza del foro.

Abbiamo calcolato la velocità di avanzamento della cricca e tenendo conto della progressiva diminuzione della sezione resistente abbiamo calcolato, in via teorica, la vita del particolare nel suo insieme.

L'esito della prova di fatica ha confermato le previsioni fatte, con un errore approssimativo del 4/5%.

In parallelo a questa prova sulla struttura, ne sono state eseguite altre che dovevano servire a dare una misura quanto più possibile precisa dell'influenza del tipo di lavorazione sulla vita del pezzo.

Particolarmente interessante è stata la ricerca di una correlazione tra la lunghezza superficiale della cricca, misurabile facilmente sulla replica, e la sua profondità.

Questo per verificare l'ipotesi che vuole che la sua profondità sia, nel peggiore dei casi, circa la metà della lunghezza, una volta considerata valida la teoria che la cricca abbia uno sviluppo a semicerchio.

Per questa ricerca ci siamo serviti di alcuni campioni già impiegati, costruiti con gradi di finitura diversi. Su questi abbiamo eseguito una serie di repliche e alesature successive, fino a eliminazione totale delle cricche.

Ci siamo così costruiti un grafico che mostra l'andamento delle lunghezze della cricca in funzione delle profondità.

I risultati così ottenuti sono documentati dalle fig. 5, 6, 7 e dal grafico di fig. 8, e sembrano confermare le ipotesi fatte.

Dall'esame di queste repliche si vede che già con la prima alesatura sono scomparse le indicazioni delle numerose microcricche distribuite su tutta la superficie.

Invece è aumentata la lunghezza delle cricche di dimensioni maggiori, e l'aumento è per tutte circa uguale.

Altre prove successive hanno confermato l'andamento del grafico, da cui appare che il massimo delle indicazioni si ha dopo aver asportato circa 1/10 mm sullo spessore.

Non è ancora stato approfondito il caso, molto frequente, di più cricche piccole che, congiungendosi tra loro, formano una cricca di dimensioni maggiori in superficie ma non in profondità.

L'origine di queste microcricche è in gran parte legato al ciclo di lavorazione e alla finitura superficia-

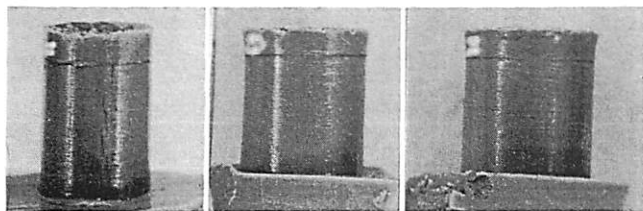


Fig. 5, 6, 7 - Repliche di alesature successive. (X 5)

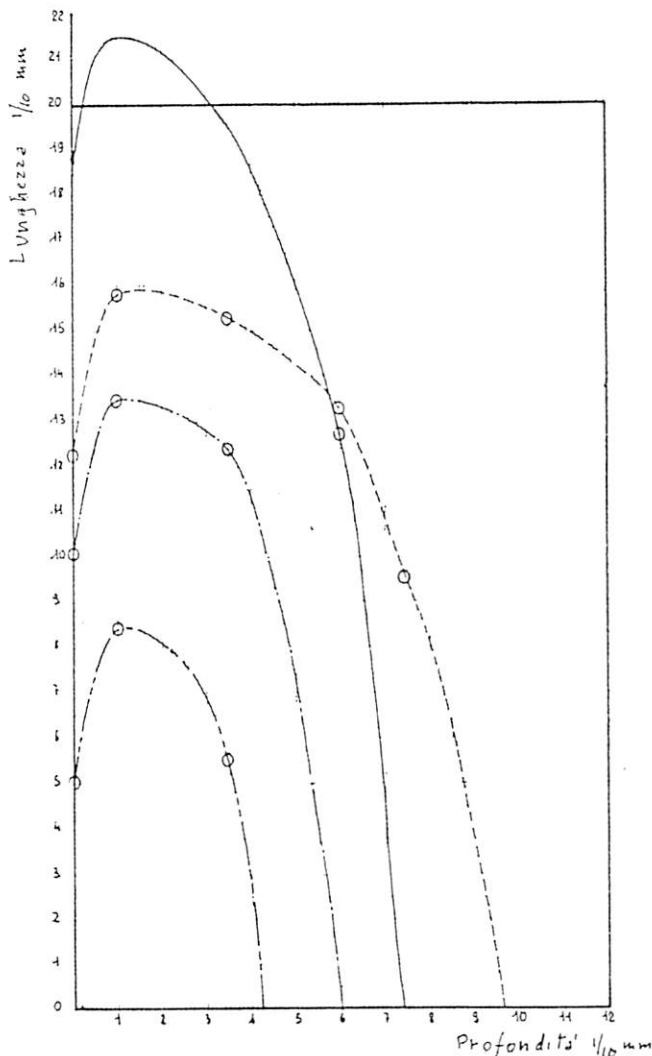


Fig. 8 - Lunghezze della cricca in funzione delle profondità.

le del foro: ogni strappo dell'utensile, ogni graffio provocato durante la messa assieme, è da considerare un innesco per cricche sempre più importanti.

Esaminando le repliche, le indicazioni relative alle cricche vere e proprie o alla incisione superficiale causata dalle lavorazioni sono facilmente distinguibili.

Infatti le cricche sono localizzate sulla generatrice più alta e più bassa del foro, in corrispondenza cioè delle zone più sollecitate: questo tipo di indicazione è in ogni caso più importante e marcato.

Invece le indicazioni relative all'incisione sono numerose e sparse su tutta la superficie del foro, e spariscono già alla prima alesatura, mentre abbiamo visto che nel caso della cricca di fatica, dopo la prima alesatura si ha un aumento della lunghezza.

Conclusioni

Sulla base dell'esperienza fatta, stiamo quindi allargando gli orizzonti delle possibilità di impiego della M.R.I., sia come controllo regolare sulle revisioni che come applicazione ai nuovi studi di ricerca.

Allo stato attuale delle cose, impieghiamo questo metodo come sussidio a quelli « classici », nei casi in cui è richiesta una grande sensibilità e una documentazione del risultato.