

EVOLUZIONE DEL DANNEGGIAMENTO NELLE GHISE SFEROIDALI DURANTE LA PROPAGAZIONE DI CRICCHE DI FATICA

V. Di Cocco, F. Iacoviello, F. Franzese

Università di Cassino, Di.M.S.A.T., via G. Di Biasio 43, 03043 Cassino (FR)

SOMMARIO

In questo lavoro è stata analizzata l'evoluzione del danneggiamento conseguente alla propagazione di cricche di fatica all'interno di due ghise sferoidali (una a matrice completamente ferritica ed una a matrice ferrito-perlitica) mediante una analisi delle superfici laterali dei provini effettuata utilizzando un microscopio elettronico a scansione, interrompendo la prova di propagazione. Tale analisi è stata completata dopo la frattura da una osservazione al SEM delle superfici di frattura. I risultati ottenuti hanno permesso di evidenziare l'importanza della microstruttura sui micromeccanismi di avanzamento della cricca di fatica e l'evoluzione del danneggiamento nel manufatto durante la propagazione della cricca.

ABSTRACT

In this work, ductile irons damaging evolution as a consequence of fatigue crack propagation was investigated. Two different ductile irons were considered (with a fully ferritic and ferritic-pearlitic matrix, respectively) and investigations were performed by means of a scanning electron microscope (SEM) analysis of the crack path, during the crack propagation (interrupted tests). Furthermore, fracture surfaces were also investigated by means of SEM analysis. According to experimental results, microstructure strongly influences crack propagation micromechanisms and the evolution of the damaging mechanisms during crack propagation.

1. INTRODUZIONE

L'attenzione verso le ghise sferoidali come materiale di impiego strutturale è cresciuta negli ultimi anni grazie alle loro migliorate caratteristiche di duttilità e resistenza, che hanno raggiunto valori comparabili con quelli tipici di numerosi acciai (Fig. 1, [1]). Queste ghise sono caratterizzate dalla presenza di grafite sotto forma sferoidale, con un conseguente minore danneggiamento della matrice metallica rispetto alle ghise lamellari. Ciò è dovuto sia all'effetto di intaglio, che risulta meno severo nel caso della ghisa sferoidale rispetto alla grafite lamellare, sia all'incremento della sezione efficace resistente, che risulta superiore nelle ghise sferoidali rispetto alle ghise lamellari, per eguali contenuti di carbonio grafítico. La ghise sferoidali sono ottenute non con prolungati trattamenti termici di ghise bianche (come nel caso delle ghise malleabili), ma mediante l'aggiunta di magnesio a circa 1450 °C. La matrice può essere ferritica, perlitica, con o senza cementite libera, ferrito-perlitica, martensitica, bainitica, austenitica. La resistenza alla propagazione della cricca di fatica è decisamente influenzata dalle caratteristiche morfologiche degli sferoidi di grafite (nodularità, distribuzione), dalla composizione chimica e dalla microstruttura [1-7].

Gli autori hanno già in precedenza analizzato l'influenza della microstruttura sulla resistenza alla propagazione della cricca (Fig. 2), in particolare considerando ghise ferrito-perlitiche ed austemperate [5-7], effettuando delle osservazioni mediante microscopio ottico di sezioni longitudinali delle superfici di frattura nichelate e preparate metallograficamente (Fig. 3-5, Nital 4 per 5 secondi; $R = 0,5$, $\Delta K = 10 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$; la cricca avanza da sinistra verso destra). Da questa analisi si evince l'importanza del meccanismo di distacco degli sferoidi dalla matrice metallica (debonding), con caratteristiche più duttili e distacco parziale oppure completo (ghisa ferritica, indicato con frecce, Fig. 3), oppure senza una

deformazione plastica evidente, come nel caso della ghisa completamente perlitica. Considerazioni legate alla morfologia della superficie di frattura, al diverso comportamento meccanico della ferrite e della perlite, ed alla peculiare distribuzione delle fasi nella ghisa ferrito-perlitica (guscio di ferrite intorno agli sferoidi, immersi in una matrice perlitica), hanno consentito di proporre un meccanismo di chiusura supplementare a quelli usualmente proposti [8-10], in cui lo sferoide ostacola una completa chiusura dell'apice grazie alla deformazione plastica conseguente al meccanismo di debonding. Nel caso poi delle ghise a matrice ferrito-perlitica, gli autori inoltre hanno proposto che a tale meccanismo se ne aggiunga un altro dovuto al fatto che in corrispondenza del K_{max} i gusci ferritici sono più deformati della matrice perlitica e, di conseguenza, in corrispondenza del K_{min} la matrice perlitica induce una residua condizione di sforzi di compressione sul guscio ferritico, con un conseguente incremento dell'effetto di chiusura (Fig. 6).

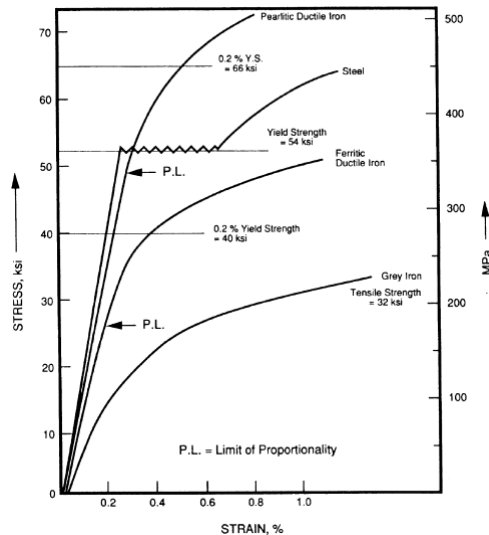


Fig. 1 - resistenza a trazione di ghise sferoidali a matrice ferritica e perlitica confrontate con il comportamento di un acciaio al carbonio e quello di una ghisa lamellare [1].

I meccanismi proposti risultano essere compatibili con i risultati delle prova di propagazione della cricca di fatica riportati nella Fig. 2. In questo lavoro è stata approfondita l'analisi dei meccanismi di danneggiamento effettuando delle prove di fatica con interruzione della prova ed osservazione della superficie laterale del provino al microscopio elettronico a scansione, focalizzando l'attenzione sia sul percorso seguito dalla cricca di fatica, sia nell'intorno della cricca in modo da evidenziare un eventuale danneggiamento supplementare.

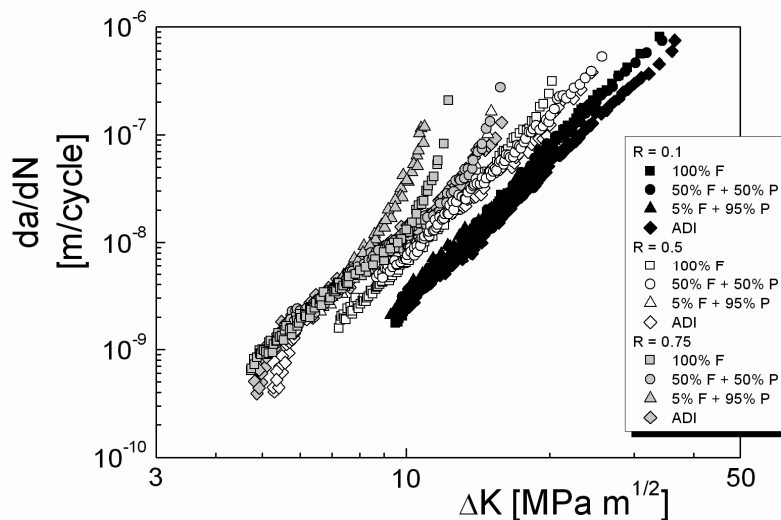


Fig. 2 - Influenza della microstruttura e del rapporto di carico sulla resistenza alla propagazione della cricca di fatica nelle ghise sferoidali [7].

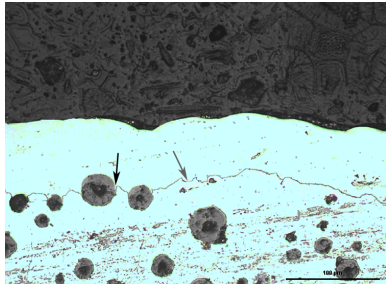


Fig. 3 - Ghisa sferoidale ferritica [7].

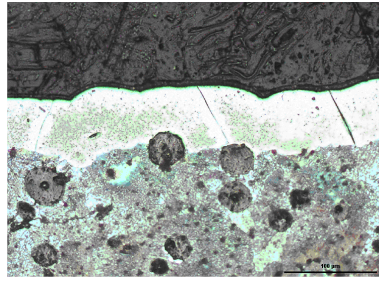


Fig. 4 - Ghisa sferoidale perlitica [7].

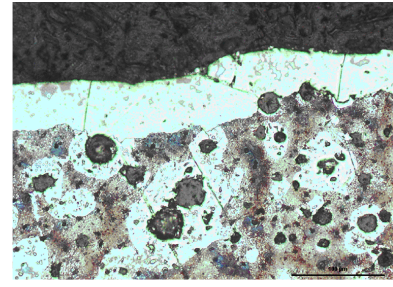


Fig. 5 - Ghisa sferoidale ferrito-perlitica [7].

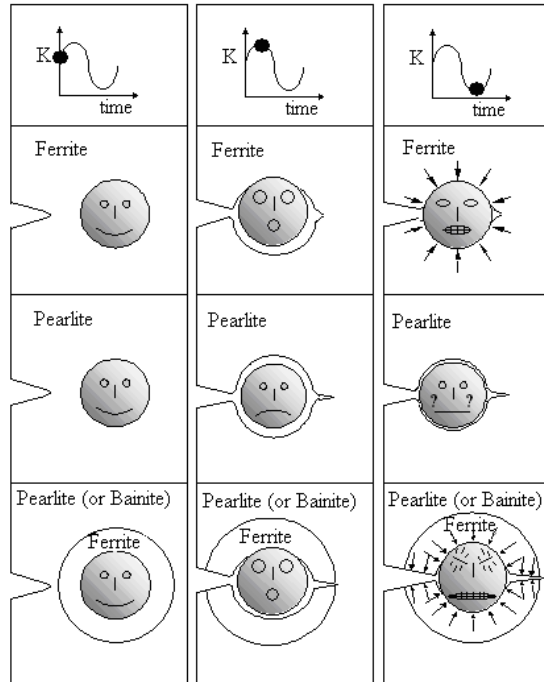


Fig. 6 - Effetto di chiusura indotto dal debonding fragile e duttile nelle ghise sferoidali [7].

2. MATERIALI E PROCEDURE SPERIMENTALI

Le composizioni chimiche e le frazioni volumetriche delle fasi delle ghise sferoidali investigate sono riportate nelle Tab.1 e 2.

Tabella 1 - Composizione chimica della ghisa sferoidale EN GJS350-22 (100% ferrite).

C	Si	Mn	S	P	Cu	Cr	Mg	Sn
3,66	2,72	0,18	0,013	0,021	0,022	0,028	0,043	0,010

Tabella 2 - Composizione chimica della ghisa sferoidale EN GJS450-10 (70% ferrite – 30% perlite).

C	Si	Mn	S	P	Cu	Cr	Mg	Sn
3,62	2,80	0,21	0,021	0,031	0,018	-	0,050	0,021

Le prove di propagazione delle cricche di fatica sono state effettuate in aria in accordo con la normativa ASTM E647 standard [11], utilizzando provini CT dello spessore di 10 mm e considerando un valore del rapporto di carico ($R = P_{min}/P_{max} = 0,1$). Le prove sono state effettuate alla temperatura ambiente, utilizzando una macchina servoidraulica (100kN) controllata mediante computer, in condizioni di ampiezza di carico costante (forma d'onda sinusoidale), con una frequenza di applicazione del carico pari a 20 Hz. La lunghezza della cricca è stata misurata mediante estensimetro meccanico. In corrispondenza di tre lunghezze della cricca (rispettivamente 13, 18 e 24

mm) le prove di fatica sono state arrestate ed i provini sono stati osservati al SEM, percorrendo ogni volta l'intera lunghezza della cricca ed analizzando un intorno di circa 2 mm. Al termine della prova, le superfici di frattura sono state osservate al SEM.

3. RISULTATI E DISCUSSIONE

I risultati delle prove di propagazione sono riportati nelle Fig. 7 ed 8: le frecce indicano le condizioni in corrispondenza delle quali si è interrotta la prova e si è proceduto all'analisi della superficie laterale.

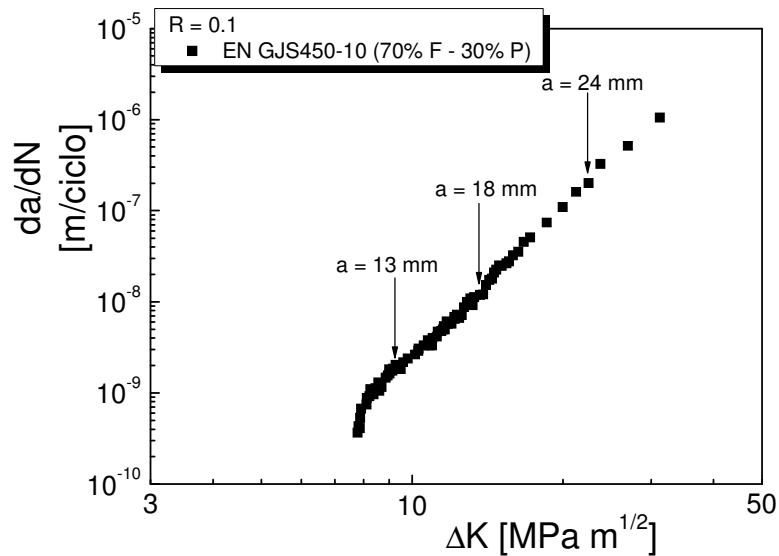


Fig. 7 - Resistenza alla propagazione della cricca di fatica della ghisa sferoidale ferrito-perlitica EN GJS 450-10.

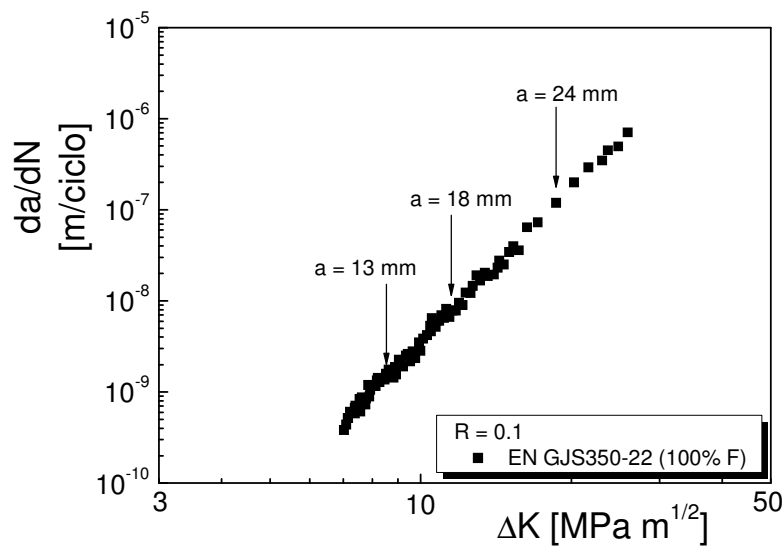


Fig. 8 - Resistenza alla propagazione della cricca di fatica della ghisa sferoidale ferritica EN GJS 350-22.

L'analisi delle superfici laterali effettuata al SEM ha evidenziato un danneggiamento che evolve durante la propagazione della cricca, sia lungo il suo percorso, che nel suo intorno. Come prevedibile, all'aumentare della lunghezza della cricca ne consegue un aumento della apertura residua della cricca, come è possibile osservare ad esempio nel caso della ghisa sferoidale ferrito-perlitica EN GJS 450-10 (Fig. 9; ΔK applicato pari a $8 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$; la cricca avanza da sinistra verso destra). Si può inoltre osservare che il debonding non è l'unico meccanismo di danneggiamento che coinvolge gli sferoidi di

grafite, ma che si può verificare anche un superamento dello sferoide secondo un profilo che vede separare un “cuore” dello sferoide (probabilmente la parte dello sferoide ottenuta durante la solidificazione dalla ghisa liquida per nucleazione e crescita) da un “guscio esterno”, presumibilmente corrispondente alla parte dello sferoide dovuta alla diffusione allo stato solido.

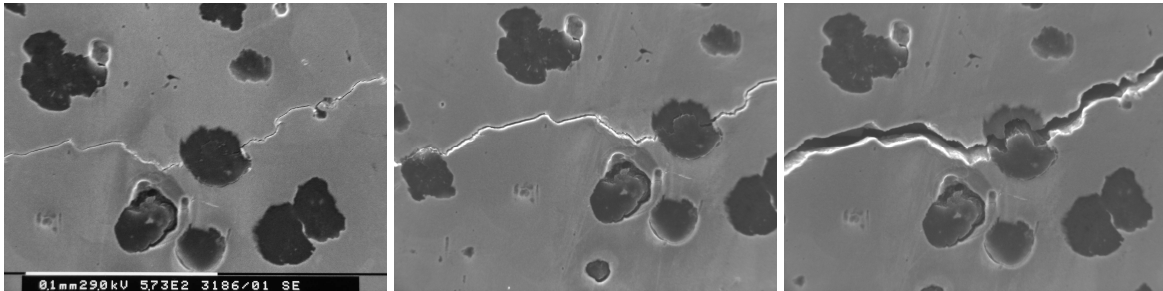


Fig. 9 - Ghisa sferoidale ferrito-perlitica EN GJS 450-10 Evoluzione del danneggiamento per misure effettuate dopo una propagazione (da sinistra verso destra) di: 13, 18 e 24 mm.

Il distacco degli elementi di grafite viene comunque osservato sia lungo il percorso della cricca (Fig. 10) che nel suo intorno. Si può osservare il distacco parziale dello sferoide in alto a sinistra (non interessato dal passaggio della cricca) sia dello sferoide più grande, con la cricca che ne segue parzialmente il contorno. Da notare che la cricca supera lo sferoide e prosegue verso destra, ma il debonding dello sferoide non si arresta, divenendo quasi completo. Inoltre è da evidenziare che la cricca risulta ramificata in cricche secondarie lunghe alcune decine di micron. Le modalità di interazione fra cricca e sferoidi possono quindi essere riassunte come segue:

- frattura dello sferoide, con frequente distacco del cuore dello sferoide dallo strato più esterno dello sferoide, presumibilmente ottenuto per diffusione allo stato solido del carbonio nella matrice austenitica (Fig. 9)
- distacco netto all'interfaccia sferoide – matrice (Fig. 10)
- propagazione intergranulare fra il guscio ferritico e la matrice perlitica (Fig. 11-a)

Il danneggiamento della ghisa non consiste solo nell'avanzamento della cricca, ma anche nel distacco degli sferoidi nel suo intorno e in un danneggiamento irreversibile nella zona antistante la cricca. Ad esempio, considerando la Fig. 11-b, si può osservare un evidente distacco dello sferoide, con la cricca che dista circa 80 μm dallo sferoide stesso.

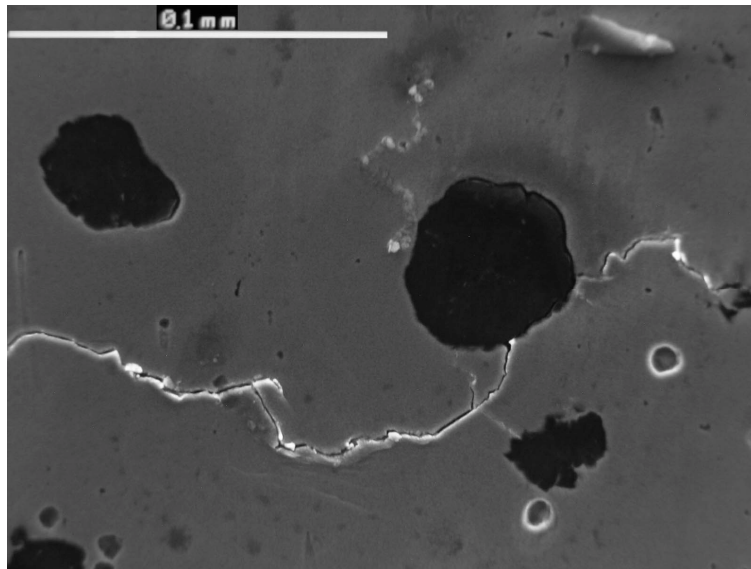


Fig. 10 - Ghisa sferoidale ferrito-perlitica EN GJS 450-10.
Danneggiamento dopo una propagazione di 18 mm ($\Delta K = 10 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$).

Nel caso della ghisa a matrice ferritica, la cricca presenta un andamento meno tortuoso. Le modalità di interazione fra cricca e sferoidi possono essere riassunte come segue:

- distacco all'interfaccia sferoide – matrice (Fig. 12), con un residuo di grafite che resta quasi sempre aderente alla matrice (almeno durante la propagazione della cricca);

- frattura dello sferoide, con distacco del cuore dello sferoide dallo strato più esterno dello sferoide, con una morfologia simile a quella già osservata con la ghisa ferrito-perlitica.

Si osserva inoltre che l'avanzamento della cricca comporta un aumento del danneggiamento anche negli sferoidi già superati dalla cricca, come si può osservare nelle Fig. 13 e 14, ottenute per due differenti avanzamenti della cricca (rispettivamente 18 e 24 mm). L'ulteriore propagazione della cricca di fatica comporta nello sferoide già superato la formazione e la propagazione di cricche interne sia nello strato più esterno dello sferoide che al suo interno. Questo fenomeno conferma il ruolo svolto dagli sferoidi nella fase di chiusura, come descritto nella Fig. 6.

Anche la ghisa sferoidale ferritica presenta cricche secondarie che propagano per alcune decine di micron prima di arrestarsi.

L'analisi delle superfici di frattura al SEM permette di integrare le osservazioni effettuate seguendo la cricca durante la propagazione.

La ghisa ferrito-perlitica presenta un frequente clivaggio dei grani ferritici che formano i gusci intorno agli sferoidi, anche per valori bassi del ΔK applicato (Fig. 15), con cricche secondarie. Non si ha evidenza di altre morfologie di danneggiamento degli sferoidi di grafite che non siano il debonding di questi dalla matrice metallica, anche per valori più elevati del ΔK (Fig. 16).

La ghisa completamente ferritica è anch'essa caratterizzata dalla sola evidenza del debonding elementi di grafite-matrice e dalla presenza di cricche secondarie (Fig. 17). L'aumento del ΔK applicato implica una maggiore importanza del clivaggio (Fig. 18).

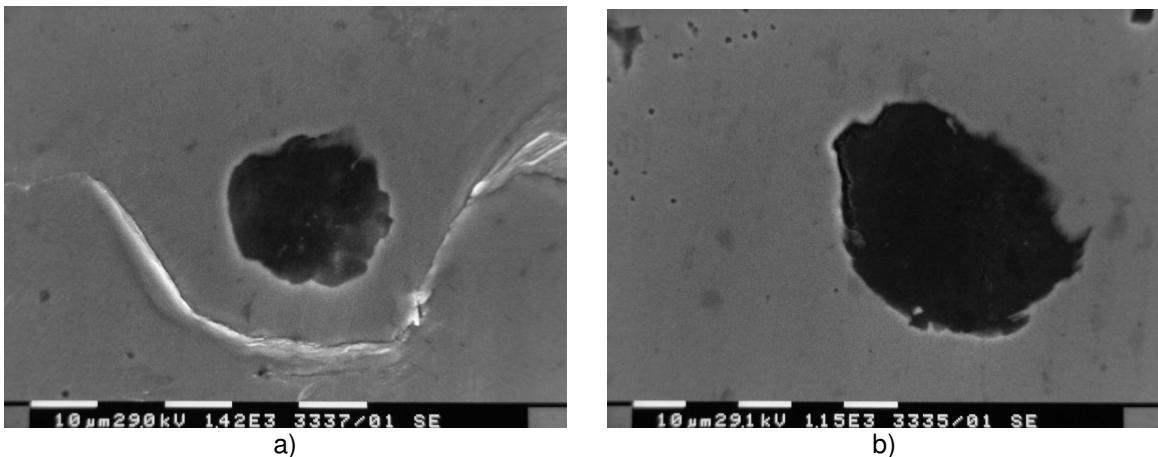


Fig. 11 - Ghisa sferoidale ferrito-perlitica EN GJS 450-10: a) danneggiamento dopo una propagazione di 18 mm ($\Delta K = 12 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$), b) danneggiamento dopo una propagazione di 18 mm (la cricca si trova sulla sinistra dello sferoide, a circa 80 μm).

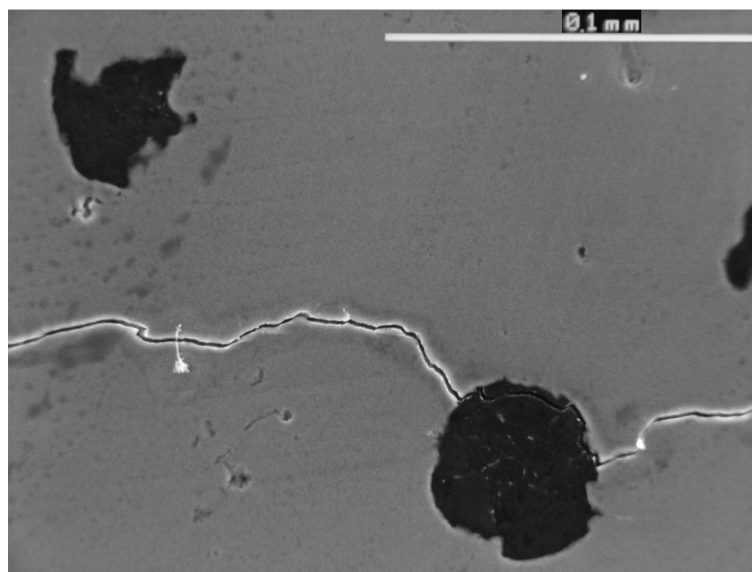


Fig. 12 - Ghisa sferoidale ferritica EN GJS350-22. Danneggiamento dopo una propagazione di 18 mm ($\Delta K = 10 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$).

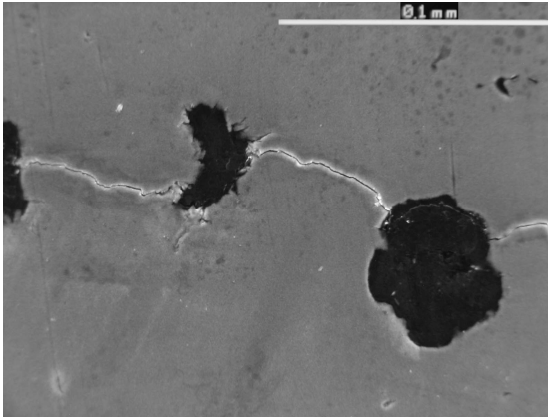


Fig. 13 - Ghisa sferoidale ferritica EN GJS350-22. Danneggiamento dopo una propagazione di 18 mm ($\Delta K = 12 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$)

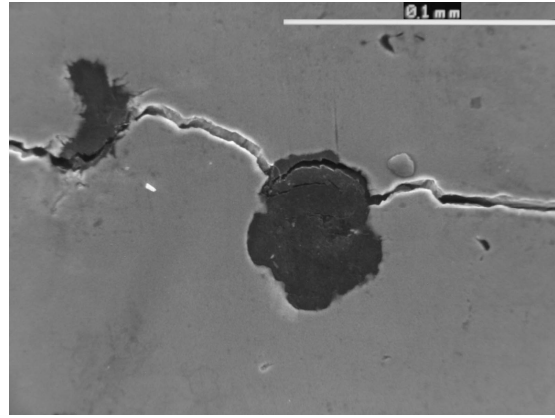


Fig. 14 - Ghisa sferoidale ferritica EN GJS350-22. Danneggiamento dopo una propagazione di 24 mm ($\Delta K = 12 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$)

L'analisi SEM delle superfici di frattura concorda quindi con le differenze sulla tortuosità del percorso della cricca: un percorso meno tortuoso come quello rilevato con la ghisa completamente ferritica concorda con la maggiore importanza del clivaggio rispetto alla ghisa ferrito-perlitica. Il fatto che l'analisi SEM delle superfici di frattura non metta in evidenza altri meccanismi di danneggiamento degli sferoidi che non siano il loro debonding dalla matrice metallica, può essere dovuto a due cause:

- bassa frequenza dei meccanismi di danneggiamento "alternativi" (ma questo non corrisponderebbe alla frequenza ottenuta nell'analisi SEM delle superfici laterali, tutt'altro che bassa);
- perdita di contatto fra i frammenti degli sferoidi e la matrice, a seguito della rottura finale del provino.

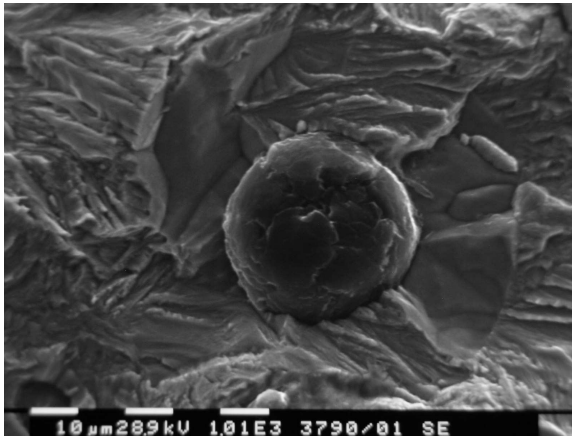


Fig. 15 - Ghisa sferoidale ferrito-perlitica EN GJS 450-10. Superficie di frattura ($\Delta K = 8 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$)

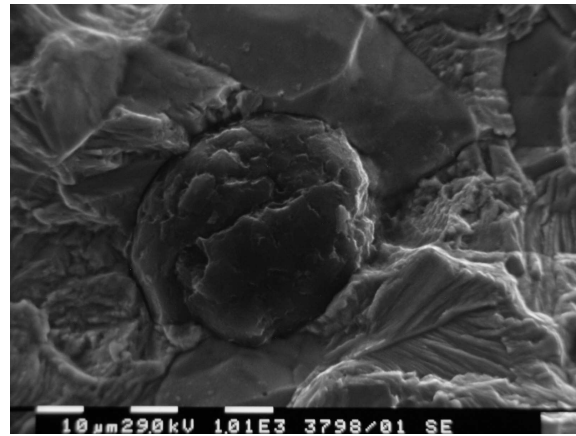


Fig. 16 - Ghisa sferoidale ferrito-perlitica EN GJS 450-10. Superficie di frattura ($\Delta K = 11 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$)

4. CONCLUSIONI

L'obiettivo di questo lavoro è stato l'approfondimento dei meccanismi di danneggiamento nelle ghise sferoidali dovuto alla propagazione della cricca di fatica, mediante prove di fatica con interruzione della prova ed osservazione della superficie laterale del provino al microscopio elettronico a scansione, focalizzando l'attenzione sia sul percorso seguito dalla cricca di fatica, sia nell'intorno della cricca in modo da evidenziare un eventuale danneggiamento supplementare.

I principali meccanismi di danneggiamento dovuti alla presenza degli sferoidi possono essere riassunti come segue:

- frattura dello sferoide, con frequente distacco del cuore dello sferoide dallo strato più esterno dello sferoide, presumibilmente ottenuto per diffusione allo stato solido del carbonio nella matrice austenitica;
- distacco netto all'interfaccia sferoide – matrice;

- propagazione intergranulare fra il guscio ferritico e la matrice perlitica (quest'ultimo meccanismo è risultato evidente solo nella ghisa ferrito-perlitica).

Dei meccanismi sopra elencati, l'analisi SEM delle superfici di frattura ha dato evidenza solo del debonding sferoide-matrice.

Infine è stata evidenziata l'evoluzione del danneggiamento negli sferoidi già superati dalla cricca, a conferma del loro ruolo giocato durante la chiusura della cricca e, quindi, del loro contributo nel meccanismo di chiusura.

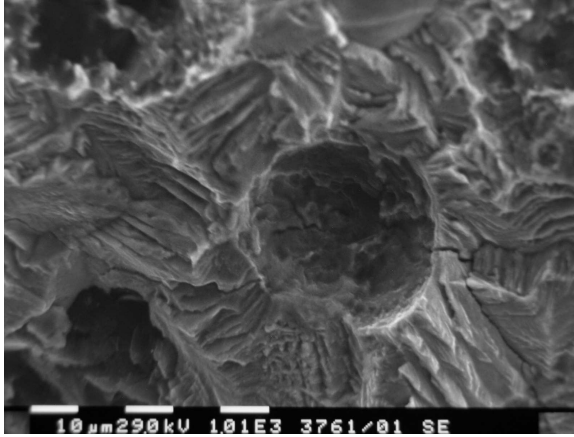


Fig. 17 - Ghisa sferoidale ferritica EN GJS350-22. Superficie di frattura ($\Delta K = 9 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$)

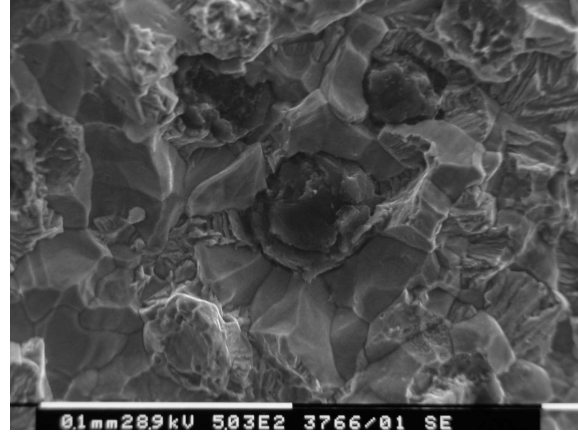


Fig. 18 - Ghisa sferoidale ferritica EN GJS350-22. Superficie di frattura ($\Delta K = 13 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$)

BIBLIOGRAFIA

- [1] Labrecque C., Gagne M., Canadian Metallurgical Quarterly 1998; 37(5): 343.
- [2] Kato Y., Hirose M., Suzuki S., Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng., 1985; 51:1161.
- [3] Griswold F.D., Stephens R.I., Int. J. of Fatigue, 1987; 1: 3.
- [4] Tokaji K., Ogawa T., Shamoto K., Fatigue, 1994; 16: 344
- [5] Cavallini M., De Santis A., Di Bartolomeo O., Iacoviello D., Iacoviello F., Atti del 31° Convegno Nazionale AIM, Milano 22-24 novembre 2006, n. 31.
- [6] Iacoviello F., De Santis A., Iacoviello D., Di Bartolomeo O., La Metallurgia Italiana, 2007; 5, in stampa.
- [7] Cavallini M., Di Bartolomeo O., Iacoviello F. Engineering Fracture Mechanics, 2007, in stampa.
- [8] Elber W., Engineering Fracture Mechanics. 1970; 2: 37.
- [9] Elber W., ASTM STP 486 Philadelphia (PA), American Society for Testing and Materials, 1971: 280.
- [10] Ritchie R.O., Suresh S., Fatigue crack growth threshold concepts. TMS-AIME, Warrendale, 1984: 227.
- [11] ASTM Standard test Method for Measurements of fatigue crack growth rates (E647-93), Annual Book of ASTM Standards (1993), 0301, American Society for Testing and Materials.