



Influenza della microstruttura sui meccanismi di avanzamento della cricca di fatica nelle ghise sferoidali

Vittorio Di Cocco, Francesco Iacoviello, Francesca Franzese

Università di Cassino, Di.M.S.A.T., via G. Di Biasio 43, 03043 Cassino (FR), v.dicocco@unicas.it

RIASSUNTO. Le ghise sferoidali costituiscono una famiglia di ghise piuttosto versatile caratterizzata da un ampio intervallo di proprietà meccaniche che possono essere ottenute mediante il controllo della microstruttura e degli sferoidi. Il controllo della microstruttura della matrice è ottenuto sia mediante il controllo della composizione chimica che del processo di produzione. Per quanto riguarda il comportamento alla frattura, la caratteristica fondamentale di queste ghise è la presenza della grafite sotto forma di noduli che, grazie alla loro morfologia, possono agire come “crack arresters”. Ciò consente di ottenere valori di duttilità e di tenacità superiori di assoluto interesse per impieghi per i quali sono previste sollecitazioni elevate, anche variabili nel tempo. In questo lavoro sono stati analizzati i micromeccanismi di avanzamento della cricca di fatica in due ghise sferoidali con differente microstruttura, sia effettuando una osservazione al microscopio elettronico a scansione (SEM) della superficie laterale dei provini durante l'esecuzione della prova di fatica (con interruzione della prova), che osservando la superficie di frattura.

PAROLE CHIAVE. Ghise sferoidali; Resistenza alla propagazione della cricca di fatica.

INTRODUZIONE

Le ghise sferoidali sono fondamentalmente delle leghe ternarie Fe-C-Si nelle quali i tenori di carbonio e di silicio sono compresi rispettivamente fra 3.5-3.9% e 1.8-2.8%. La scelta della composizione chimica è generalmente determinata dalla dimensione del getto e dalle proprietà meccaniche desiderate. Le particelle di grafite sono presenti sotto forma di noduli e la loro formazione e controllo sono determinati dalla purezza della lega e dall'aggiunta di elementi sferoidizzanti [1]. I noduli di grafite nucleano nel liquido solitamente in corrispondenza di vari tipi di inclusioni (ad esempio MgS, CaS, SrS, MgO etc., ma è stata osservata la nucleazione di sferoidi di grafite anche nel ferro ultra puro), e crescono per diffusione allo stato solido del carbonio attraverso il guscio di austenite che viene a formarsi intorno al nucleo [2, 3]. Le caratteristiche geometriche degli sferoidi di grafite, insieme alla microstruttura della matrice determinano le proprietà meccaniche delle ghise sferoidali. In particolare gli sferoidi possono agire come “crack arresters”, permettendo di ottenere valori di duttilità e di tenacità di assoluto interesse per impieghi per i quali sono previste sollecitazioni elevate, anche variabili nel tempo. Ovviamente tale risultato viene ottenuto solo nel caso di una buona nodularizzazione della grafite medesima. Una sua degenerazione può altresì implicare un indebolimento della matrice metallica, con gli elementi di grafite che non agiscono più come “crack arresters”, ma, piuttosto, possono generare cricche secondarie [4]. Le ottime proprietà meccaniche dipendono anche dalla microstruttura e spesso questa viene utilizzata per designare le differenti tipologie di ghise sferoidali commercialmente disponibili (Fig. 1). Le ghise sferoidali ferritiche sono caratterizzate da una elevata duttilità e da una resistenza a trazione comparabile ad un acciaio con basso tenore di carbonio; nel caso di matrice perlitica, si ottengono una più elevata resistenza a trazione, una buona resistenza all'usura ed una moderata duttilità. Le ghise ferrito-perlitiche sono caratterizzate da proprietà sostanzialmente intermedie rispetto alle prime due. Le ghise sferoidali martensitiche presentano una resistenza estremamente elevata, ma valori ridotti di tenacità e duttilità. Le microstrutture bainitiche sono caratterizzate da una elevata durezza. Le ghise austenitiche presentano una elevata resistenza alla corrosione, buona resistenza a trazione ed una elevata stabilità dimensionale alle temperature elevate. Infine,

le ghise sferoidali austemperate, di più recente ottimizzazione, offrono una resistenza all'usura elevatissima ed un'ottima resistenza a fatica [1, 6].

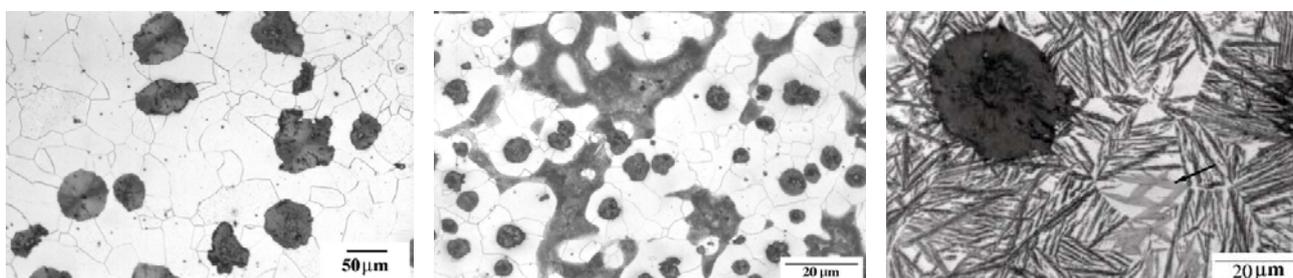


Figura 1: Possibili microstrutture nelle ghise sferoidali.
Da sinistra verso destra: ferritica, ferrito-perlitica, austemperata a 350°C per 64 minuti [5].

Precedenti attività sperimentali [7-9] sono state focalizzate sull'analisi dell'influenza della microstruttura sulla resistenza alla propagazione della cricca (Fig. 2), in particolare considerando ghise ferrito-perlitiche ed austemperate. I micromeccanismi di avanzamento sono stati osservati sia procedendo a tradizionali analisi al microscopio elettronico a scansione (SEM) delle superfici di frattura, che effettuando delle osservazioni di sezioni longitudinali delle superfici di frattura nichelate e preparate metallograficamente mediante microscopio ottico (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).

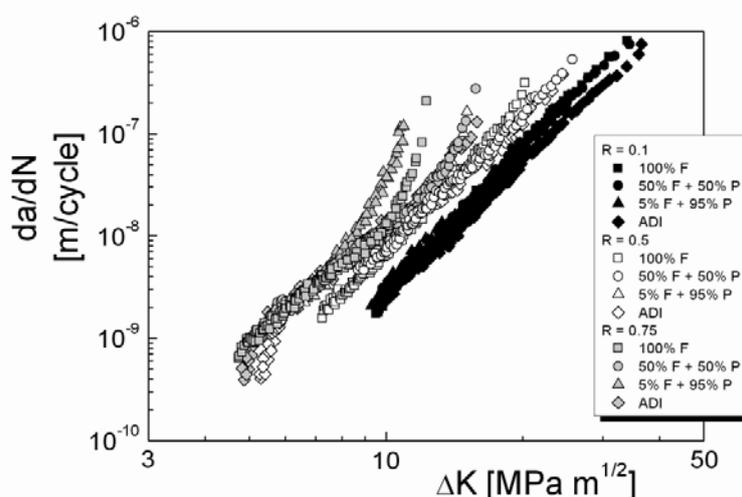


Figura 2: influenza della microstruttura e del rapporto di carico sulla resistenza alla propagazione della cricca di fatica nelle ghise sferoidali.

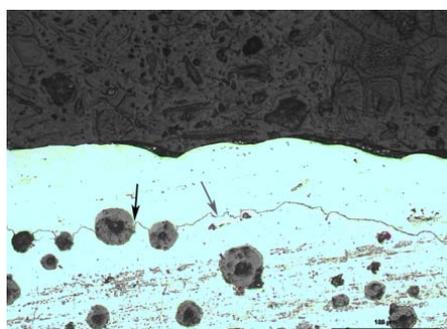


Figura 3: Ghisa sferoidale ferritica [9].

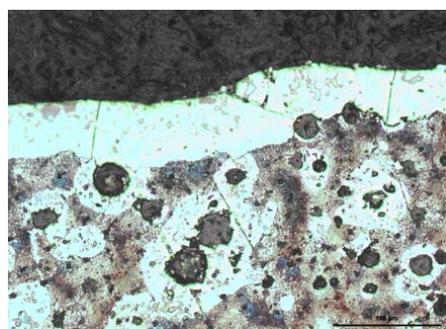


Figura 4: Ghisa sferoidale ferrito-perlitica [9].

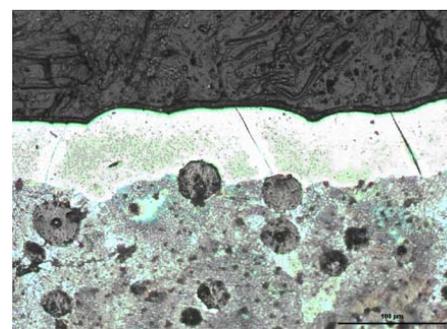


Figura 5: Ghisa sferoidale perlitica [9].



L'analisi effettuata ha permesso di evidenziare 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 (Fig. 5). La presenza degli sferoidi, unitamente alla eventuale deformazione plastica della matrice metallica, hanno permesso di proporre un meccanismo di chiusura supplementare a quelli usualmente proposti [10-12], in cui gli sferoidi ostacolano la completa chiusura dell'apice della cricca. Inoltre, nel caso della matrice ferrito-perlitica, la particolare distribuzione delle fasi (solitamente la ferrite sotto forma di guscio intorno agli sferoidi, mentre la perlite costituisce la matrice), ed il differente comportamento meccanico della ferrite e della perlite, hanno permesso di proporre un meccanismo di chiusura supplementare. Infatti, in corrispondenza del K_{max} , i gusci ferritici si deformano maggiormente rispetto alla matrice perlitica: di conseguenza, in corrispondenza del K_{min} , la matrice perlitica induce una residua condizione di sforzo di compressione sul guscio ferritico, con un conseguente incremento dell'effetto di chiusura (Fig. 6).

Una più analisi approfondita del contributo degli sferoidi di grafite alla resistenza a trazione di ghise sferoidali ferrito-perlitiche ha però evidenziato, oltre alla presenza del "debonding", la presenza di meccanismi di danneggiamento supplementari, fra cui la formazione di cricche interne agli sferoidi prima della formazione di cricche nella matrice metallica e di meccanismi di danneggiamento "a cipolla" [8, 13]: nel caso di alcune microstrutture, tali meccanismi "supplementari" hanno una importanza superiore a quella del distacco matrice-sferoide di grafite. A partire da questi risultati si è ritenuto necessario approfondire ulteriormente il ruolo degli sferoidi di grafite nell'avanzamento della cricca di fatica nelle ghise sferoidali ferrito-perlitiche considerando differenti microstrutture, investigando anche l'eventuale danneggiamento nei dintorni della cricca.

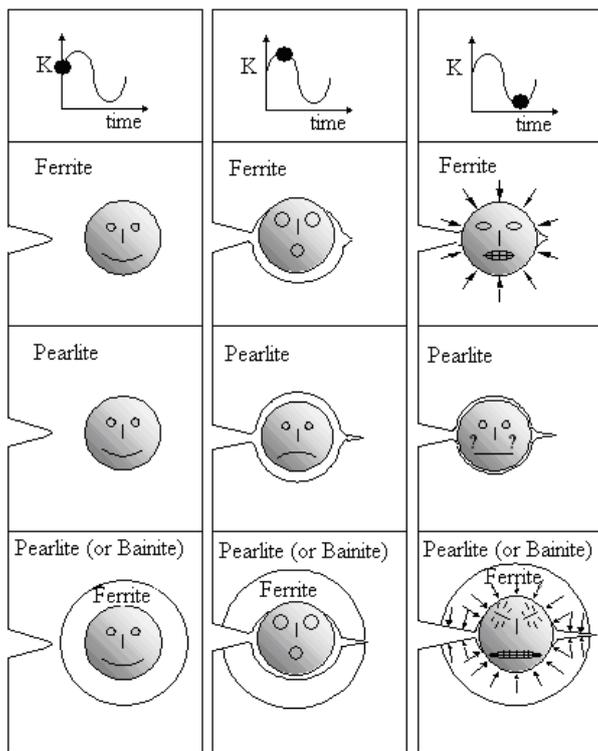


Figura 6: Ghise sferoidali: effetto di chiusura indotto dal "debonding" matrice-sferoidi [9].

MATERIALI E METODOLOGIE SPERIMENTALI

Sono state investigate due differenti ghise sferoidali. La prima è caratterizzata da una matrice completamente ferritica (Tab.1). La seconda, ferrito-perlitica, è stata ottenuta mediante ricottura di una ghisa sferoidale perlitica (Tab.2), con frazioni volumetriche finali di ferrite e perlite approssimativamente equivalenti. In questo caso, la ferrite non risulta



essere localizzata intorno agli sferoidi di grafite, come invece avviene nel caso delle ghise ferrito-perlitiche ottenute mediante il controllo della composizione chimica. Le due ghise investigate risultano caratterizzate da una elevata nodularità degli elementi di grafite.

C	Si	Mn	S	P	Cu	Cr	Mg	Sn
3.62	2.72	0.19	0.011	0.021	0.019	0.031	0.047	0.011

Tabella 1: Composizione chimica della ghisa sferoidale ferritica.

C	Si	Mn	S	P	Cu	Cr	Mg	Sn
3.59	2.65	0.19	0.012	0.028	0.04	0.061	0.060	0.098

Tabella 2: Composizione chimica della ghisa sferoidale ferrito-perlitica (ottenuta mediante trattamento termico).

La procedura di prova adottata per seguire l'avanzamento della cricca di fatica è stata la seguente:

- preparazione metallografica dei provini CT utilizzati per la prova di propagazione della cricca di fatica;
- esecuzione della prova di avanzamento della cricca di fatica effettuando tre interruzioni;
- osservazione al microscopio elettronico a scansione (SEM) della superficie laterale del provino, effettuata seguendo il percorso della cricca e le sue interazioni con gli sferoidi, analizzando anche lo stato di danneggiamento al suo apice.

Le prove di propagazione della cricca di fatica sono state effettuate in aria in accordo alla normativa ASTM E647 [14], utilizzando provini CT di 10 mm di spessore e considerando tre differenti valori del rapporto di carico ($R = K_{\min}/K_{\max} = 0.1; 0.5; 0.75$), in analogia con precedenti campagne di prova effettuate con altre ghise sferoidali. Le prove sono state effettuate, in condizioni di ampiezza di carico applicato costante, utilizzando una macchina idraulica da 100 kN, considerando una frequenza di sollecitazione di 20 Hz ed una forma d'onda della sollecitazione sinusoidale. Le misure di avanzamento della cricca sono state effettuate in maniera continua mediante estensimetro meccanico e controllate a campione mediante microscopio ottico (x40). Le superfici di frattura sono state analizzate sia è effettuata l'analisi al SEM delle superfici di frattura (in tutte le foto ottenute al SEM e riportate in questo lavoro, la cricca avanza da sinistra verso destra).

Infine, un'ulteriore analisi dei micromeccanismi di danneggiamento è stata effettuata mediante il microscopio ottico (LOM), osservando sezioni trasversali dei provini CT dopo l'esecuzione della prova di propagazione della cricca di fatica, secondo la seguente procedura:

- rivestimento della superficie di frattura mediante deposito di Nichel (al fine di proteggere detta superficie dalle successive operazioni);
- taglio dei provini mediante troncatrice diamantata, ortogonalmente alla direzione di propagazione della cricca (ovvero secondo un valore di ΔK approssimativamente costante);
- inglobamento delle sezioni ottenute e loro preparazione metallografica (fino ad utilizzare una soluzione acquosa contenente Al_2O_3 con granulometria pari a $0.2 \mu m$);
- attacco chimico del provino (Nital 2, 5 s);
- osservazione mediante microscopio metallografico (LOM) della sezione trasversale del provino.

RISULTATI E COMMENTI

Considerando il comportamento macroscopico delle due ghise investigate (Fig. 7), la microstruttura non sembra avere una evidente importanza: le differenze fra le velocità di avanzamento sembrano effettivamente molto ridotte ed anche per quanto riguarda i valori di soglia, ΔK_{th} , anche questi non sembrano mostrare differenze molto evidenti (la ghisa sferoidale ferrito-perlitica sembra essere caratterizzata da valori di soglia più bassi rispetto alla ghisa a matrice ferritica, ma le differenze sono veramente minime).

L'analisi dei profili di frattura effettuati al SEM durante l'avanzamento della cricca consente di evidenziare meccanismi di avanzamento che in parte dipendono dalla microstruttura della ghisa investigata.

Nel caso della ghisa sferoidale ferritica si possono osservare:

- Ramificazione della cricca (Fig. 8);



- Distacco (“debonding”) matrice-sferoidi (Fig. 9, 10, 11);
- Presenza di cricche all’interno degli sferoidi (Fig. 9, 10, 11).
- Cricche secondarie nella matrice, in corrispondenza degli sferoidi (Fig. 12).

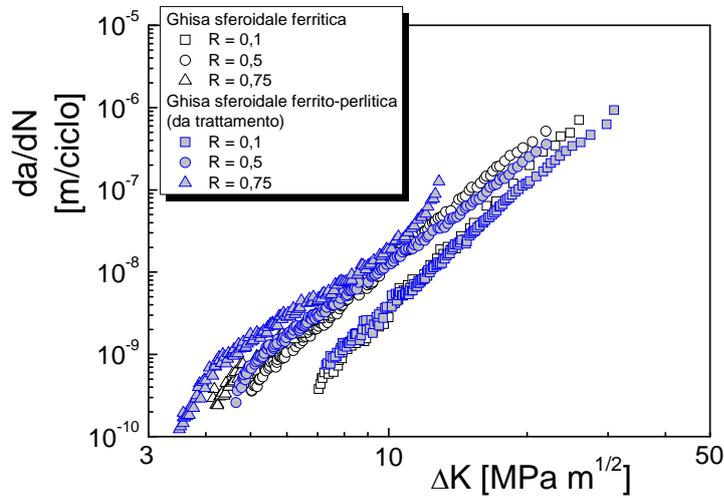


Figura 7: Resistenza alla propagazione della cricca di fatica per le due ghise sferoidali investigate ($R = 0.1, 0.5, 0.75$).

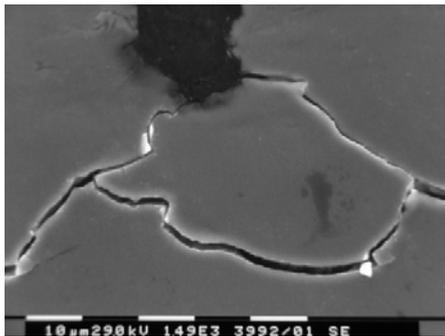


Figura 8: Ghisa sferoidale ferritica: ramificazione della cricca ($R = 0.5, \Delta K = 6.5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$)

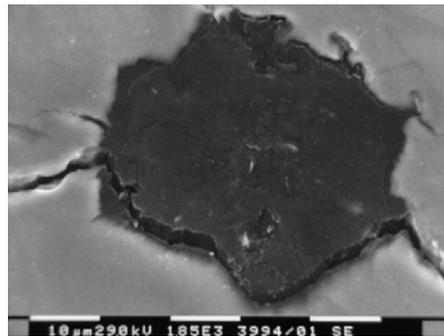


Figura 9: Ghisa sferoidale ferritica: distacco matrice - sferoidi ($R = 0.5, \Delta K = 9 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$)

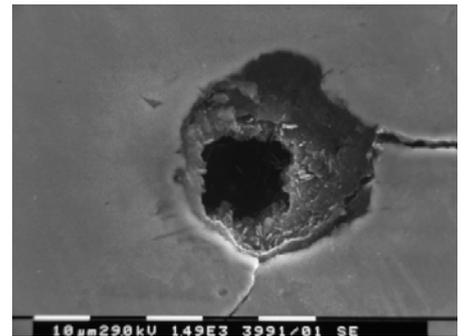


Figura 10: Ghisa sferoidale ferritica: distacco matrice - sferoidi ($R = 0.5, \Delta K = 10 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$)

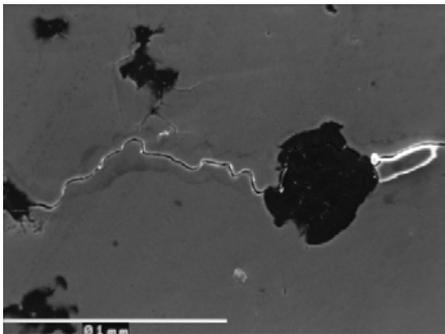


Figura 11: Ghisa sferoidale ferritica: distacco matrice - sferoidi ($R = 0.1, \Delta K = 9 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$)

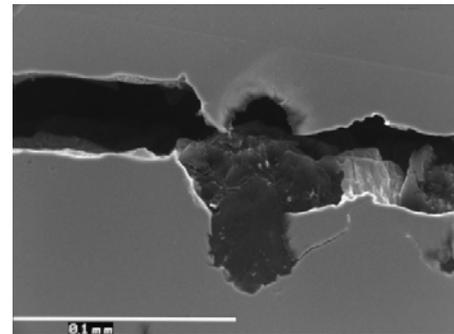


Figura 12: Ghisa sferoidale ferritica: distacco matrice - sferoidi e cricche secondarie ($R = 0.75, \Delta K = 6 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$)

Queste morfologie sono osservate indipendentemente dalle condizioni di sollecitazione. Per quanto riguarda la ramificazione della cricca, questa procede per alcune decine di micron, con un successivo ricongiungimento (Fig. 8). Per quanto riguarda il distacco, è da notare che questo non risulta essere localizzato esattamente all’interfaccia sferoide-

matrice, quanto, piuttosto, riguarda più frequentemente lo strato più esterno dello sferoide: il risultato è una disgregazione dello sferoide, con la formazione di numerose cricche all'interno (Fig. 9), ed il possibile distacco dello strato superficiale dal "nucleo" dello sferoide (Fig. 10), oppure ancora l'avanzamento della cricca all'interno dello sferoide, con un percorso che solitamente evita il centro dello sferoide (Fig. 11). Gli sferoidi, inoltre, possono divenire inneschi di cricche secondarie che possono avanzare per alcune decine di micron (Fig. 12).

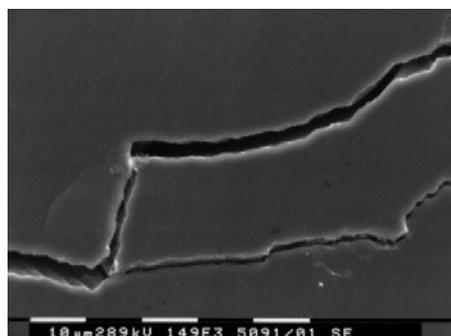


Figura 13: Ghisa ferrito-perlitica ottenuta mediante trattamento termico. Ramificazione della cricca (R = 0.75; $\Delta K = 7 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$).

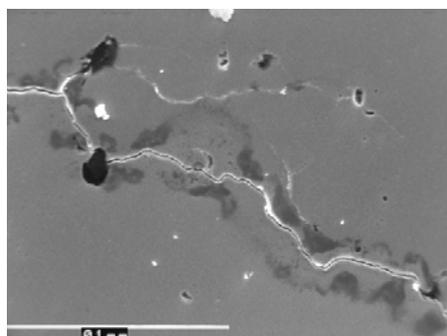


Figura 14: Ghisa ferrito-perlitica ottenuta mediante trattamento termico. Ramificazione della cricca (R = 0.1; $\Delta K = 10 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$).

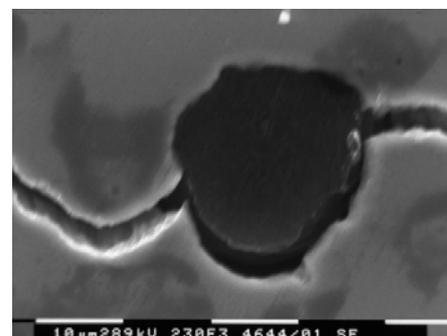


Figura 15: Ghisa ferrito-perlitica ottenuta mediante trattamento termico. Distacco matrice-nodulo di grafite (R = 0.1; $\Delta K = 15 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$).

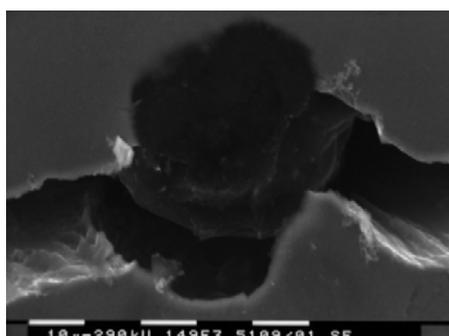


Figura 16: Ghisa ferrito-perlitica ottenuta mediante trattamento termico. Distacco matrice-nodulo di grafite (R = 0.75; $\Delta K = 8 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$).

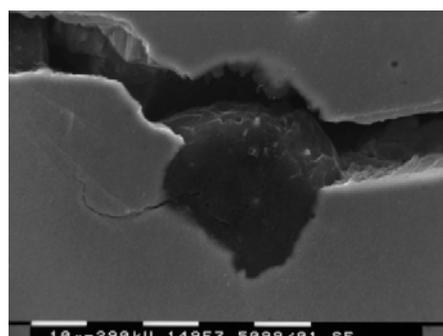


Figura 17: Ghisa ferrito-perlitica ottenuta mediante trattamento termico: distacco matrice - sferoidi e cricche secondarie (R = 0.75, $\Delta K = 8 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$).

Nel caso della ghisa ferrito-perlitica, la ramificazione della cricca diviene decisamente più importante rispetto alla ghisa sferoidale a matrice ferritica (Fig. 13, 14), con formazione di cricche secondarie di lunghezza superiore al centinaio di micro che non necessariamente si ricongiungono con la cricca principale (Fig. 14). Il distacco matrice-sferoide si localizza quasi sempre all'interfaccia e la formazione di cricche secondarie all'interno degli sferoidi diviene più rara, anche se non impossibile (Fig. 17). Il distacco duttile matrice-noduli di grafite rende possibile localmente un contatto anticipato durante la fase di chiusura fra le due superfici di frattura, con la possibile nascita locale di uno stato di sollecitazione misto I+II (come evidente nella Fig. 16).

L'analisi SEM delle superfici di frattura permette di evidenziare i differenti meccanismi di propagazione della cricca di fatica ed il differente ruolo svolto dagli sferoidi di grafite.

Nel caso della ghisa sferoidale ferritica, si evidenzia la formazione di zone di clivaggio e di striature (Fig. 18 e 19), con gli sferoidi di grafite caratterizzati da un notevole danneggiamento e parziale disgregazione. Tale processo avviene indipendentemente dalle condizioni di sollecitazione (differenti valori di R e ΔK), ed è messo in evidenza sia dalla perdita della forma sferica da parte degli elementi di grafite, sia dalla presenza di "fori" sulla superficie di frattura contenenti evidenti residui di grafite (Fig. 20).

Nel caso della ghisa ferrito-perlitica ottenuta mediante trattamento termico, gli sferoidi sono caratterizzati da una disgregazione praticamente trascurabile per tutte le condizioni di sollecitazione investigate, conservando quasi sempre una forma sferica praticamente immutata, e non lasciando "residui" di grafite all'interno delle sedi dopo il distacco dello



sferoide (Fig. 21 e 22). Il clivaggio risulta essere presente prevalentemente per bassi valori di ΔK , e solo raramente intorno agli sferoidi di grafite, come ad esempio mostrato in Fig. 22.

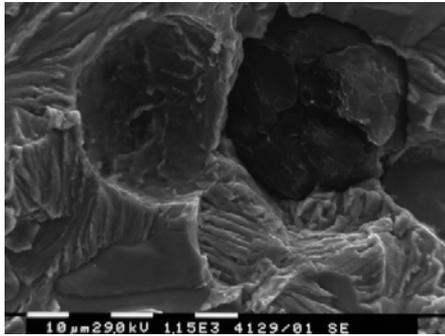


Figura 18: Ghisa sferoidale ferritica. Analisi SEM della superficie di frattura ($R = 0.5$; $\Delta K = 10 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$).

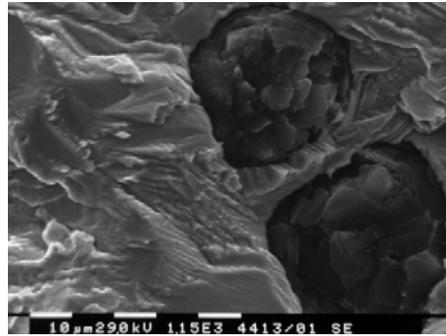


Figura 19: Ghisa sferoidale ferritica. Analisi SEM della superficie di frattura ($R = 0.75$; $\Delta K = 5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$).

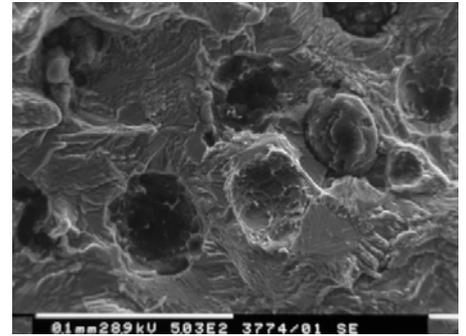


Figura 20: Ghisa sferoidale ferritica. Analisi SEM della superficie di frattura ($R = 0.1$; $\Delta K = 20 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$).

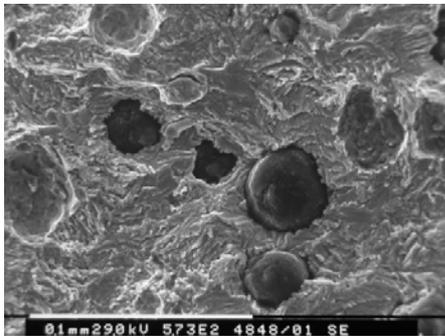


Figura 21: Ghisa sferoidale ferrito-perlitica. Analisi SEM della superficie di frattura ($R = 0.5$; $\Delta K = 5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$).

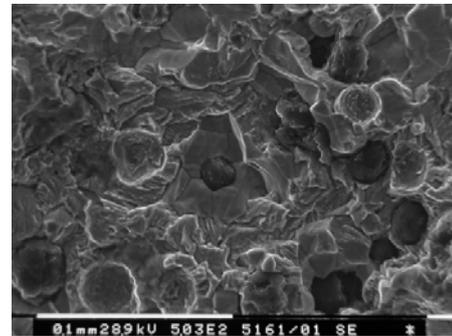


Figura 22: Ghisa sferoidale ferrito-perlitica. Analisi SEM della superficie di frattura ($R = 0.1$; $\Delta K = 20 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$).

L'analisi LOM delle sezioni trasversali, infine, conferma il differente ruolo svolto dagli sferoidi nell'avanzamento della cricca di fatica. Nel caso della ghisa sferoidale ferritica il profilo risulta essere caratterizzato da una evidente disaggregazione degli sferoidi: ciò è evidente sia negli sferoidi ancora aderente alla superficie di frattura, parzialmente disaggregati, che in quelli che si sono distaccati da essa, ma che lasciano "residui" di grafite nella sede (indicati in Fig. 23 con frecce).

Nel caso della ghisa ferrito-perlitica ottenuta mediante trattamento termico, gli sferoidi disaggregati sono decisamente più rari ed i punti della matrice sede di sferoidi non presentano residui di grafite (Fig. 24, anche in questo caso indicati con frecce).

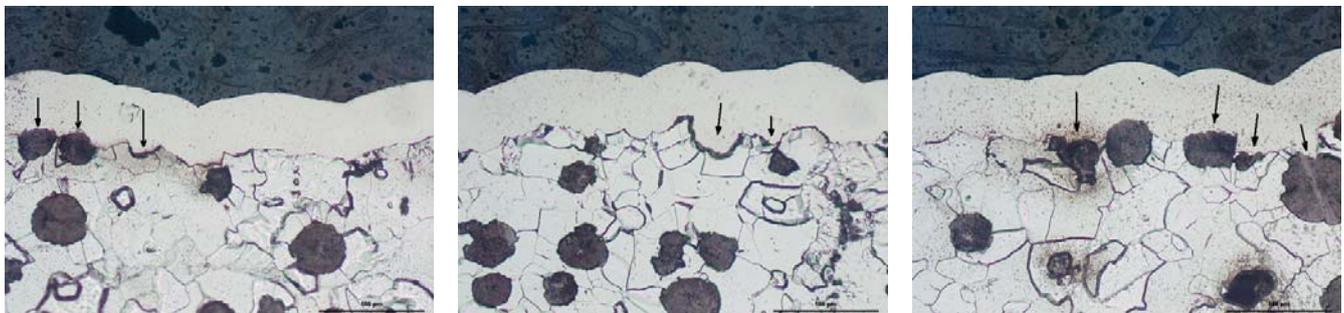


Figura 23: Ghisa sferoidale ferritica. Analisi LOM del profilo trasversale (da sinistra verso destra, $R = 0.1$, $\Delta K = 9, 13, 21 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, rispettivamente).



Figura 24: Ghisa sferoidale ferrito-perlitica. Analisi LOM del profilo trasversale (da sinistra verso destra, $R = 0.1$, $\Delta K = 9, 13, 21 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, rispettivamente).

CONCLUSIONI

In questo lavoro è stata investigata l'influenza della microstruttura sulla resistenza alla propagazione delle cricche di fatica in due ghise sferoidali, rispettivamente una a matrice completamente ferritica ed una con matrice ferrito-perlitica ottenuta mediante trattamento termico (la ferrite presente non è localizzata intorno agli sferoidi come nel caso della ghisa ferrito-perlitica ottenuta controllando la composizione chimica). Le superfici laterali dei provini sono state osservate al SEM durante l'evoluzione della prova, interrompendo in più momenti la prova di avanzamento della cricca, in modo da ottenere maggiori informazioni sui principali meccanismi di danneggiamento. Ulteriori analisi dei meccanismi di danneggiamento sono state effettuate al SEM osservando le superfici di frattura, e mediante osservazioni LOM di sezioni trasversali delle superfici di frattura nichelate. Dai risultati sperimentali ottenuti è possibile riassumere i seguenti risultati:

- il ruolo svolto dagli sferoidi di grafite differisce in base alla microstruttura della matrice. Nel caso della ghisa ferritica si osserva un distacco degli sferoidi dalla matrice con sfaldatura dei primi ed evidenti "residui" di grafite sulla superficie di frattura. La ghisa ferrito-perlitica è invece caratterizzata da un distacco sferoidi-matrice che si sviluppa quasi completamente all'interfaccia, senza una evidente "sfaldatura" degli sferoidi stessi che conservano una evidente integrità geometrica e che non lasciano "residui" di grafite sulla superficie di frattura;
- la ramificazione della cricca di fatica nel suo avanzamento è evidente per entrambe le ghise sferoidali investigate, ma la ghisa ferrito-perlitica presenta cricche secondarie più lunghe che, contrariamente alla ghisa ferritica, non si ricongiungono sempre con il percorso principale;
- entrambe le ghise investigate sono caratterizzate da una cricca di fatica che avanza formando striature e, in alcuni casi, per clivaggio, senza che si verifichi una particolare localizzazione delle due morfologie di avanzamento.

BIBLIOGRAFIA

- [1] C. Labrecque, M. Gagne, *Canadian Metallurgical Quarterly*, 37 (1998) 343.
- [2] H. Morrogh, *The solidification of Metals*, The Iron and Steel Institute (1967) 238.
- [3] T. Skaland, O. Grong, T. Grong, *Metall. Trans. A*, 24A (1993) 2321.
- [4] G.L. Greno, J.L. Otegui, R.E. Boeri, *International Journal of Fatigue*, 21 (1999) 35.
- [5] <http://www.msm.cam.ac.uk/phasetrans/2001/adi/cast.iron.html>.
- [6] R.G. Ward, *An introduction to the physical chemistry of iron and steel making*, Arnold, London (1962).
- [7] M. Cavallini, A. De Santis, O. Di Bartolomeo, D. Iacoviello, F. Iacoviello, *Atti del 31° Convegno Nazionale AIM*, Milano (2006) 31.
- [8] F. Iacoviello, A. De Santis, D. Iacoviello, O. Di Bartolomeo, *Atti del Convegno IGFXIX*, – Milano, (2007) 10.
- [9] M. Cavallini, O. Di Bartolomeo, F. Iacoviello, *Engineering Fracture Mechanics*, 75 (2008) 694.
- [10] W. Elber, *Engineering Fracture Mechanics*, 2 (1970) 37.
- [11] W. ELBER, *ASTM STP 486 Philadelphia (PA)*, American Society for Testing and Materials (1971) 280.
- [12] R.O. Ritchie, S. Suresh, *Fatigue crack growth threshold concepts*. TMS-AIME, Warrendale (1984) 227.
- [13] F. Iacoviello, V. Di Cocco, V. Piacente, O. Di Bartolomeo, *Materials Science and Engineering A*, 478(1-2) (2008) 186.
- [14] *ASTM Standard test Method for Measurements of fatigue crack growth rates (E647-93)*. Annual Book of ASTM Standards. 0301, American Society for Testing and Materials (1993).