



## Resistenza alla propagazione della cricca di fatica nelle ghise sferoidali

Francesco Iacoviello, Vittorio Di Cocco, Francesca Franzese

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

---

**RIASSUNTO.** In questo lavoro sono riportati i risultati sperimentali ottenuti negli ultimi anni presso il gruppo di Metallurgia dell'Università di Cassino relativamente alla caratterizzazione della resistenza alla propagazione delle cricche di fatica nelle ghise sferoidali, all'analisi dell'influenza della microstruttura su detta resistenza ed alla caratterizzazione dei micromeccanismi di avanzamento della cricca. Sono state considerate ghise sferoidali con matrice ferrito-perlitica (con differenti frazioni volumetriche di ferrite e perlite), sia ottenute mediante il controllo della composizione chimiche che modificando il trattamento termico, e ghise sferoidali austemperate. Le prove di propagazione sono state effettuate in aria considerando 3 differenti rapporti di carico ( $R = K_{min}/K_{max}$ ), rispettivamente pari a 0.1, 0.5 e 0.75.

**PAROLE CHIAVE.** Ghise sferoidali; Propagazione cricca di fatica.

---

### INTRODUZIONE

Nel 1943, durante un convegno dell' American Foundrymen's Society, venne posto il problema se si potesse controllare la forma della grafite nella realizzazione delle ghise grigie. Alcune settimane dopo nei laboratori della International Nickel Company Reserch la ricercatrice Keith Dwight Millis, grazie all'aggiunta di piccole quantità di magnesio, sotto forma di una lega rame-magnesio, notò che, a solidificazione avvenuta, la ghisa non conteneva lamelle di carbonio ma piuttosto grafite sotto forma di sferoidi quasi regolari [1]. Questi sferoidi di grafite hanno, a parità di volume, la minima superficie e, quindi, la loro presenza implica una sezione resistente della matrice maggiore, minimizzando l'effetto di intaglio degli elementi di grafite. Nel corso dei decenni, il successo delle ghise sferoidali (Ductile cast Iron, DCI) è stato crescente e numerosi fattori hanno contribuito a tale successo, fra cui la versatilità, elevata resistenza meccanica ed i limitati costi di produzione [2]. Sono attualmente disponibili commercialmente numerose tipologie di ghise sferoidali con differenti matrici che consentono di ottenere una grande varietà di proprietà meccaniche. Si può incrementare la duttilità nelle ghise con matrice ferritica (A% superiore al 18%), oppure aumentare la resistenza a trazione (fino ad 850MPa e, considerando le ghise austemperate, di più recente ottimizzazione, fino a 1600 MPa), conservando sempre una elevata resistenza all'usura. La microstruttura della matrice viene sovente utilizzata per classificare le differenti tipologie di ghise sferoidali [1, 2], secondo le seguenti tipologie (Fig. 1):

- ✓ Ghise sferoidali a matrice ferritica, caratterizzate da una resistenza a trazione pari a quella di un acciaio dolce;
  - ✓ Ghise con matrice perlitica, caratterizzate da una resistenza a trazione decisamente più elevata, con una buona resistenza all'usura ed una ridotta duttilità;
  - ✓ Ghise ferrito-perlitiche, con proprietà intermedie rispetto alle prime due;
  - ✓ Ghise sferoidali martensitiche, caratterizzate da una resistenza a trazione molto elevata ma con bassi valori di tenacità e duttilità;
  - ✓ Ghise sferoidali austenitiche, con una elevata resistenza alla corrosione, buona resistenza meccanica e stabilità dimensionale ad elevata temperatura;
  - ✓ Ghise austemperate, con una elevata resistenza all'usura ed alla fatica.
-

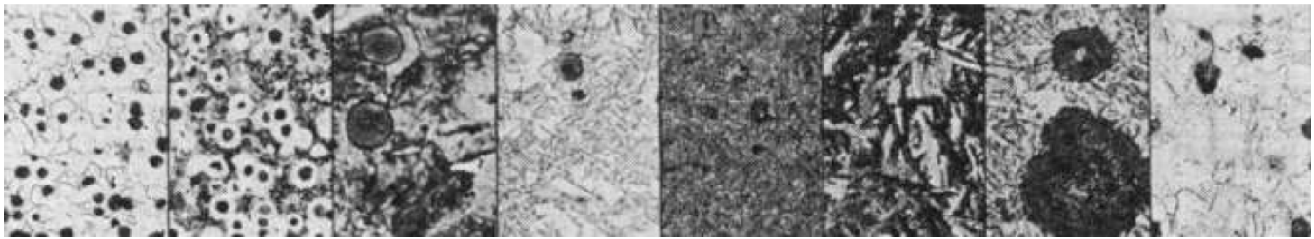


Figura 1: Differenti microstrutture nelle ghise sferoidali. Da sinistra verso destra (con differenti ingrandimenti): ferritica, ferrite-perlitica, perlitica, martensitica, bonificata, austemperata ( $R_m = 1050$  MPa), austemperata ( $R_m = 1600$  MPa), austenitica [1].

La disponibilità in letteratura di lavori dedicati all'analisi della resistenza alla propagazione della cricca di fatica nelle ghise sferoidali è andata crescendo [3-10] con l'incremento del numero di applicazioni di questa classe di ghise. Tale resistenza è risultata essere dipendente dalla frazione volumetrica della grafite, dalla morfologia degli elementi, dalla composizione chimica, dalla frazione volumetrica delle fasi presenti e dalle modalità di sollecitazione.

In questo lavoro sono riportati i risultati ottenuti negli ultimi anni dal gruppo di Metallurgia dell'Università di Cassino [11-21], approfondendo in particolare il ruolo della microstruttura e delle condizioni di sollecitazione ( $\Delta K$  applicato ed  $R$ ) sui micromeccanismi di avanzamento. Fra le numerose leghe considerate negli anni, in questo lavoro l'attenzione si focalizza su quattro ghise ferrito-perlitiche e su una ghisa austemperata.

## MATERIALI INVESTIGATI E METODOLOGIE SPERIMENTALI

**S**ono state investigate cinque ghise sferoidali con differenti microstrutture della matrice metallica e caratterizzate da una elevata nodularizzazione degli elementi di grafite.

Sono state anzitutto considerate tre ghise sferoidali caratterizzate da una matrice ferrito-perlitica, partendo da una da una matrice completamente ferritica, per arrivare ad una quasi completamente perlitica. Le composizioni chimiche e le frazioni volumetriche delle fasi e dei costituenti strutturali sono riportati nelle Tab. 1-3.

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 1: Composizione chimica della DCI EN GJS350-22 (100% ferrite), Fig. 2.

C	Si	Mn	S	P	Cu	Cr	Mg	Sn
3.65	2.72	0.18	0.010	0.03	-	0.05	0.055	0.035

Tabella 2: Composizione chimica della DCI EN GJS500-7 (50% ferrite – 50% perlite), Fig. 3.

C	Si	Mn	S	P	Cu	Mo	Ni	Cr	Mg	Sn
3.59	2.65	0.19	0.012	0.028	0.04	0.004	0.029	0.061	0.060	0.098

Tabella 3: Composizione chimica della DCI EN GJS700-2 (100% perlite), Fig. 4.

È stata quindi considerata una DCI ferrito-perlitica (frazioni volumetriche pari circa al 50%) ottenuta non mediante il controllo della composizione chimica, come per la EN GJS500-7, ma mediante ricottura di una ghisa perlitica EN GJS700-2 (Tab. 3). Come si può osservare nella Fig. 5, la ferrite non risulta essere localizzata intorno agli sferoidi di grafite a formare una sorta di guscio, come invece evidenziato nella DCI ferrito-perlitica ottenuta mediante il controllo della composizione chimica (Fig. 3). La nodularità degli elementi di grafite rimane comunque elevata.

La quinta DCI investigata è invece una ghisa austemperata ADI, denominata GGG 70BA (composizione chimica nella Tab. 4).

Tale ghisa è stata ottenuta effettuando il seguente trattamento termico:

- ✓ riscaldamento in forno a 910°C (70 minuti);
- ✓ raffreddamento in bagno di sali fusi (2 ore a 370°C e, quindi, 60, secondi a 320°C);
- ✓ raffreddamento in aria fino alla temperatura ambiente.



Dopo tale trattamento è possibile osservare una ridotta degenerazione degli sferoidi di grafite ed una buona omogeneità della microstruttura bainitica (la frazione volumetrica di ferrite residua è decisamente ridotta).

C	Si	Mn	Mo	Ni	Sn	S
3.61	2.23	0.32	0.42	0.52	0.045	0.015

Tabella 4: Composizione chimica della DCI austemperata GGG 70BA (completamente bainitica), Fig. 6.

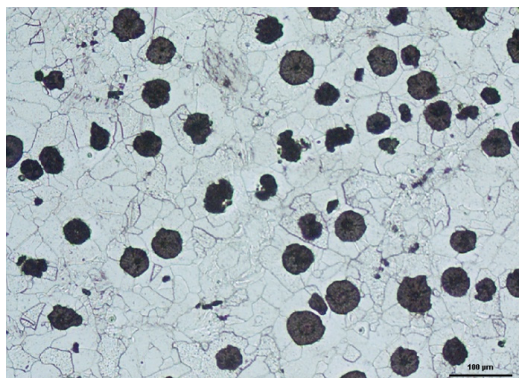


Figura 2: DCI EN GJS350-2 (100% ferrite): microstruttura (Nital 3).

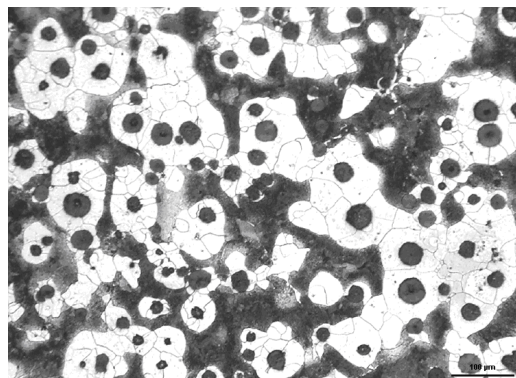


Figura 3: DCI EN GJS500-7 (50% ferrite - 50% perlite): microstruttura (Nital 3).

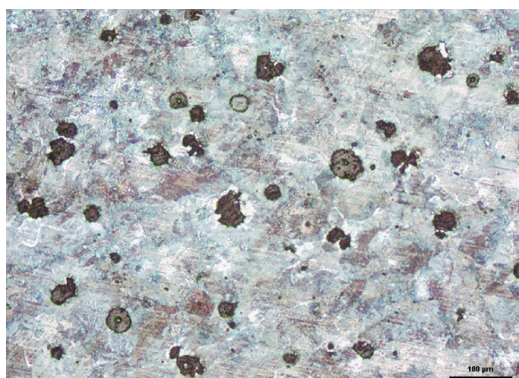


Figura 4: DCI EN GJS700-2 (100% perlite): microstruttura (Nital 3).

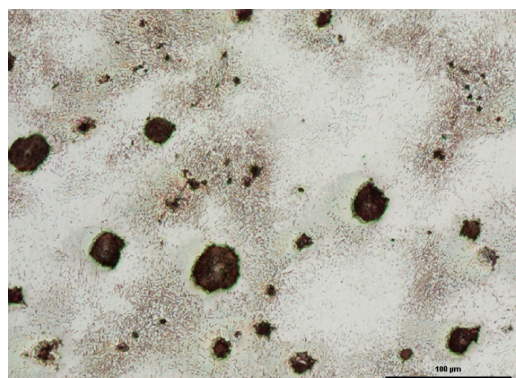


Figura 5: DCI ferrito-perlitica ottenuta mediante ricottura di una DCI perlitica EN GJS700-2 (risultato finale: 50% ferrite - 50% perlite circa): microstruttura (Nital 2).

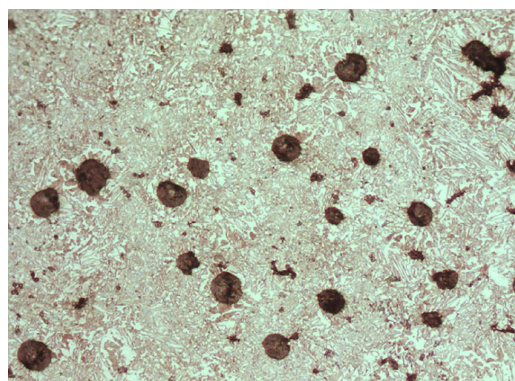


Figura 6: DCI austemperata (ADI) GGG 70BA: microstruttura (Nital 3).

Le prove sono state effettuate alla temperatura ambiente, utilizzando una macchina servoidraulica INSTRON 8501 (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. Le prove sono state effettuate in accordo con la normativa ASTM E647



[22] utilizzando provini CT (Compact Type) dello spessore di 10 mm: sono stati investigati tre differenti valori del rapporto di carico ( $R = P_{\min}/P_{\max} = 0,1; 0,5; 0,75$ ).

La lunghezza della cricca è stata misurata mediante estensimetro meccanico ed è stata saltuariamente controllata mediante microscopio ottico (ingrandimento 40x).

Al fine di analizzare i micromeccanismi di avanzamento della cricca di fatica, sono state utilizzate differenti procedure:

- ✓ 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 (solo le DCI con matrice ferritica, perlitica e ferrito-perlitica da trattamento termico). Tale procedura è stata eseguita interrompendo la prova di propagazione della cricca di fatica.
- ✓ analisi della superficie di frattura di tipo “tradizionale”, utilizzando un microscopio elettronico a scansione (SEM);
- ✓ analisi dei profili di frattura mediante osservazione al microscopio ottico (LOM) di sezioni trasversali nichelate e preparate metallograficamente (Fig. 7).

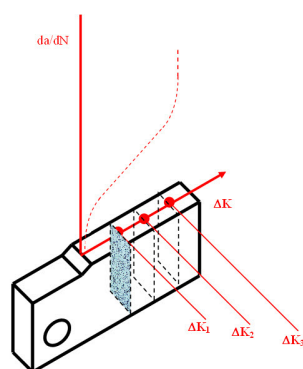


Figura 7: Modalità di preparazione del provino CT dopo rottura a fatica per l'osservazione del profilo di frattura.

## RISULTATI E COMMENTI

L'influenza del rapporto di carico  $R$  e della microstruttura sulla resistenza alla propagazione della cricca di fatica sono riportati nelle Fig. 8 e 9, partendo dal comportamento delle ghise ferrito-perlitiche (ottenute mediante controllo della composizione chimica), per passare a confronto fra la DCI ferrito-perlitica ottenuta mediante il controllo della composizione chimica e caratterizzata dal migliore comportamento a fatica con la ghisa austemperata e la ferrito-perlitica ottenuta mediante trattamento termico.

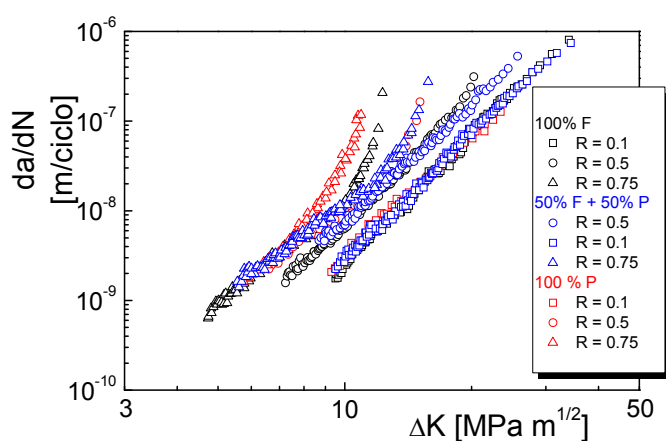


Figura 8: Influenza del rapporto di carico e della microstruttura sulla resistenza alla propagazione della cricca di fatica nelle ghise sferoidali ferrito-perlitiche (controllo composizione chimica).

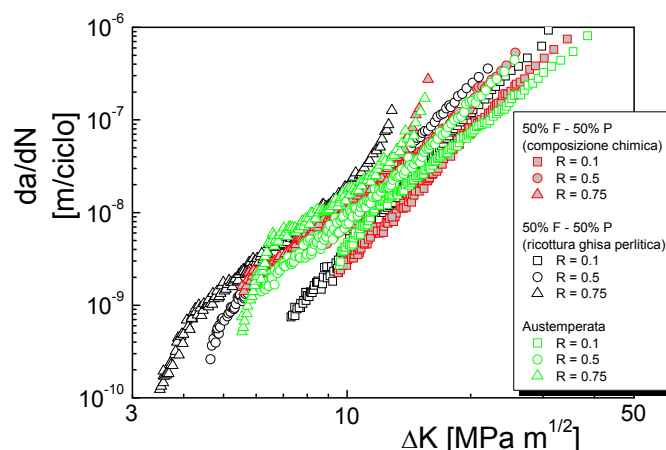


Figura 9: Resistenza a fatica nelle ghise sferoidali ferrito-perlitiche (ottenute con controllo composizione chimica oppure del trattamento termico) e nella ghisa austemperata.

Per tutte le ghise sferoidali investigate, si può osservare una evidente influenza del rapporto di carico sulla propagazione della cricca di fatica dovuto all'effetto di chiusura. All'aumentare del rapporto di carico, infatti, le velocità di avanzamento





umentano (per  $\Delta K$  costante) e si evidenzia una diminuzione del valore di soglia  $\Delta K_{th}$  e del valore del  $\Delta K$  corrispondente alla rottura di schianto. Tali differenze sono maggiormente evidenti per valori di R più bassi (fra 0.1 e 0.5), mentre per rapporti di carico più elevati sono meno evidenti. Per quanto riguarda le ghise ferrito-perlitiche ottenute mediante il controllo della composizione chimica, la peculiare distribuzione della ferrite e della perlite nella ghisa ferrito-perlitica EN GJS500-7 comporta una più elevata resistenza alla propagazione della cricca di fatica, specialmente per valori più elevati del rapporto di carico e del  $\Delta K$  applicato (Fig. 8). Confrontando la ghisa ferrito-perlitica GJS500-7 con le due ghise trattate termicamente (quella ferrito-perlitica e quella austemperata), si può osservare come quella ottenuta mediante il controllo della composizione chimica, e caratterizzata da una localizzazione della ferrite intorno agli sferoidi di grafite, risulta avere una resistenza alla propagazione della cricca più elevata rispetto alla ghisa ferrito-perlitica ottenuta mediante ricottura di un ghisa perlitica. Le differenze diventano sempre più evidenti con l'incremento del rapporto di carico. Nel caso della ghisa austemperata la resistenza alla propagazione della cricca è simile a quella offerta dalla ghisa ferrito-perlitica ottenuta mediante il controllo della composizione chimica, per tutti i rapporti di carico investigati.

#### Analisi SEM dei profili di avanzamento

L'analisi SEM dei profili di avanzamento delle cricche effettuate interrompendo la prova di propagazione ha permesso di identificare alcuni meccanismi di avanzamento (in tutte le foto che seguono, la cricca avanza da sinistra verso destra). Nel caso della ghisa a matrice ferritica, una analisi qualitativa consente di affermare che il profilo della cricca è caratterizzato da un andamento piuttosto tortuoso. L'interfaccia matrice metallica-sferoide di grafite non costituisce necessariamente un cammino preferenziale di avanzamento della cricca: infatti, la cricca può superare lo sferoide senza incontrarlo anche se prossimo (Fig. 10), attraversarlo (Fig. 11, caso più raro), oppure ancora avanzare in corrispondenza dell'interfaccia sferoide-matrice (Fig. 12, 13). In quest'ultimo caso il distacco (debonding) non è mai netto, ma permangono residui di grafite all'interno della cavità lasciata dallo sferoide. Sono talora presenti delle cricche secondarie: le ramificazioni possono innescarsi in corrispondenza di uno sferoide (Fig. 13) oppure all'interno della matrice (Fig. 13, 14), avanzando per alcune decine di micron, per arrestarsi nella matrice oppure ricongiungendosi con il percorso principale della cricca (Fig. 14). All'interno degli sferoidi si può osservare la presenza di un danneggiamento ulteriore rispetto alla cricca principale, consistente in microcricche (ad esempio, Fig. 12).

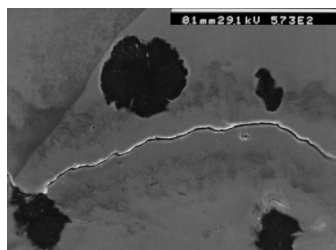


Figura 10: DCI ferritica  
(R = 0.1,  $\Delta K$  = 10 MPa $\sqrt{m}$ ).

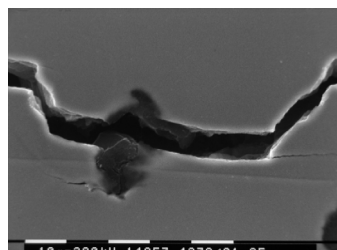


Figura 11: DCI ferritica  
(R = 0.5,  $\Delta K$  = 10 MPa $\sqrt{m}$ ).

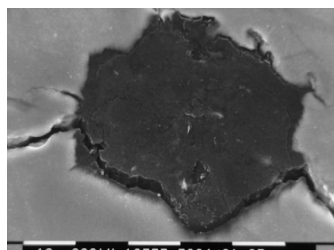


Figura 12: DCI ferritica  
(R = 0.5,  $\Delta K$  = 12 MPa $\sqrt{m}$ ).

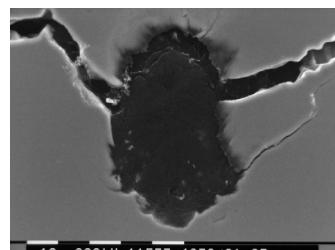


Figura 13: DCI ferritica  
(R = 0.75,  $\Delta K$  = 9 MPa $\sqrt{m}$ ).

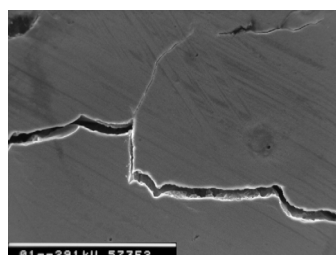


Figura 14: DCI ferritica  
(R = 0.5,  $\Delta K$  = 13 MPa $\sqrt{m}$ ).

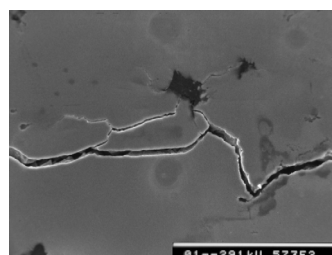


Figura 15: DCI ferritica  
(R = 0.5,  $\Delta K$  = 18 MPa $\sqrt{m}$ ).

Gli sferoidi in prossimità della cricca, ma non da essa direttamente incontrati, non presentano alcuna forma di danneggiamento, né al loro interno e tanto meno all'interfaccia sferoide-matrice. All'aumentare del  $\Delta K$  applicato, si osserva una diminuzione della "tortuosità" del profilo. All'aumentare del  $\Delta K$ , quindi, l'importanza dell'effetto di chiusura dovuto alla rugosità della superficie diminuisce, mentre aumenta l'importanza dell'effetto di chiusura dovuto alla plasticizzazione dell'apice della cricca. Infatti, considerando che le prove sono condotte per  $\Delta P = \text{cost}$ , questo implica un

aumento del  $K_{max}$  con l'avanzamento della cricca e, quindi, un conseguente incremento del valore del raggio di plasticizzazione.

Nel caso della ghisa sferoidale con matrice completamente perlitica, il percorso della cricca sembra essere decisamente meno tortuoso rispetto alla ghisa a matrice ferritica analizzata nelle pagine precedenti (Fig. 16). L'interazione della cricca può presentare degli attraversamenti degli sferoidi (Fig. 16), anche se la tipologia prevalente di interazione sferoide-cricca di fatica consiste nel distacco netto (debonding) dello sferoide dalla matrice metallica (Fig. 17, 18). Le lamelle di ferrite e di perlite non costituiscono necessariamente un percorso preferenziale per l'avanzamento della cricca di fatica. Infatti, anche se talvolta si può osservare un distacco delle lamelle appunto dovuto al passaggio della cricca (Fig. 19), la morfologia prevalente è quella di una sostanziale indifferenza della cricca rispetto alla direzione delle lamelle, anche nel caso di lamelle orientate in maniera decisamente favorevole al loro distacco, ovvero nel caso di un angolo fra il piano delle lamelle e la direzione di propagazione della cricca estremamente ridotto (Fig. 20, 21). La presenza di cricche secondarie è molto più rara rispetto alla ghisa a matrice ferritica (Fig. 22), tendendo comunque sempre a ricongiungersi con il percorso della cricca principale piuttosto che fermarsi all'interno della matrice metallica, mentre si può osservare il danneggiamento di sferoidi non interessati direttamente dal passaggio della cricca, sotto forma di cricche interne, preferenzialmente, ma non unicamente, sotto forma di cricche centrali (Fig. 23).

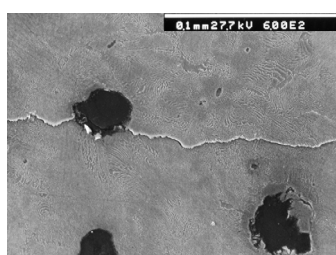


Figura 16: DCI perlitica  
( $R = 0.1$ ,  $\Delta K = 13 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ).

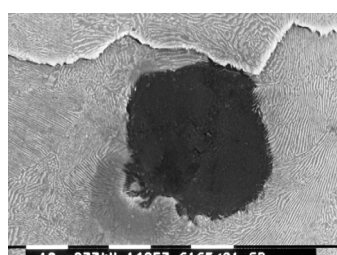


Figura 17: DCI perlitica  
( $R = 0.1$ ,  $\Delta K = 15 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ).

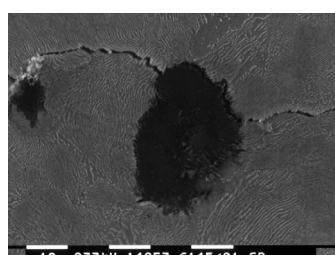


Figura 18: DCI perlitica  
( $R = 0.5$ ,  $\Delta K = 10 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ).

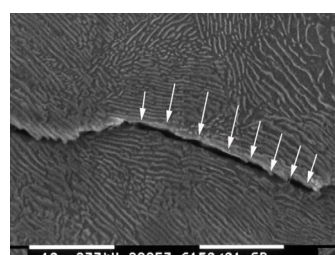


Figura 19: DCI perlitica  
( $R = 0.75$ ,  $\Delta K = 7 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ).

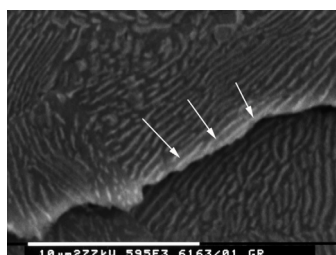


Figura 20: DCI perlitica  
( $R = 0.1$ ,  $\Delta K = 12 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ).

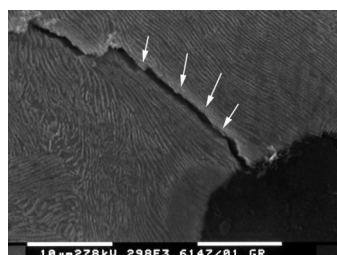


Figura 21: DCI perlitica  
( $R = 0.75$ ,  $\Delta K = 8 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ).

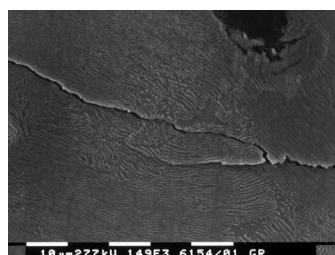


Figura 22: DCI perlitica  
( $R = 0.1$ ,  $\Delta K = 11.5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ).

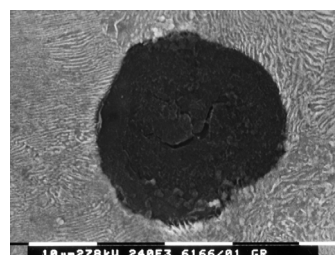


Figura 23: DCI perlitica (la cricca si trova al di sotto dello sferoide, a circa  $30 \mu\text{m}$ ).

La ghisa sferoidale ferrito-perlitica ottenuta mediante ricottura della ghisa perlitica presenta un profilo di avanzamento che risulta essere intermedio rispetto alle due ghise precedentemente analizzate. Infatti, come la ghisa ferritica, il profilo è caratterizzato dalla presenza di numerose cricche secondarie che si diramano dal percorso principale, spesso riunendosi nuovamente con la cricca principale (Fig. 24), mentre, come la ghisa perlitica, presenta un distacco netto degli sferoidi dalla matrice metallica per tutte le condizioni di sollecitazione investigate (Fig. 25-27).

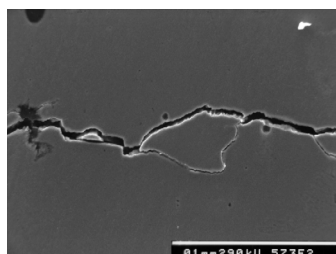


Figura 24: DCI ferrito-perlitica da trattamento  
( $R = 0.75$ ,  $\Delta K = 6 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ).

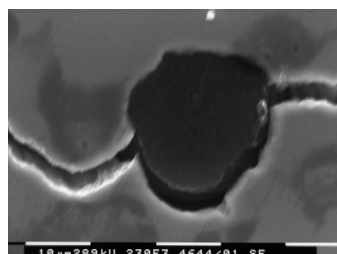


Figura 25: DCI ferrito-perlitica da trattamento  
( $R = 0.1$ ,  $\Delta K = 10 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ).

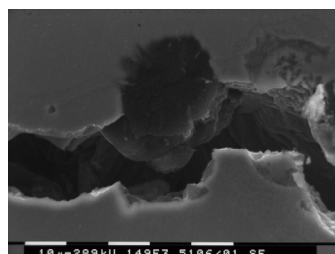


Figura 26: DCI ferrito-perlitica da trattamento  
( $R = 0.5$ ,  $\Delta K = 8 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ).

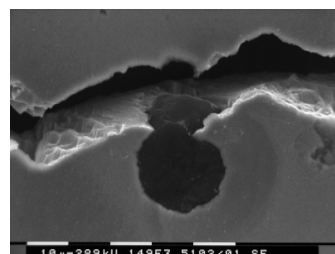


Figura 27: DCI ferrito-perlitica da trattamento  
( $R = 0.75$ ,  $\Delta K = 8 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ).



### Analisi SEM delle superfici di frattura

Al termine delle prove di propagazione della cricca di fatica, tutti i provini sono stati sottoposti ad una analisi SEM delle superfici di frattura di tipo “tradizionale” (nelle foto seguenti, la cricca procede sempre da sinistra verso destra).

La ghisa sferoidale ferritica è caratterizzata dalla presenza di cricche secondarie (Fig. 28), rottura per clivaggio dei grani ferritici (Fig. 29), ed un distacco degli sferoidi dalla matrice metallica che sovente comporta una parziale frantumazione dello sferoide, con la presenza di grafite nella cavità lasciata dallo sferoide (Fig. 30). Tale parziale frantumazione è confermata sia nel caso di sferoidi che restano inglobati nella matrice (Fig. 31, punto 1), che nel caso di sferoidi “asportati” con un evidente residuo nella cavità (Fig. 31, punto 2). Dopo il passaggio della cricca, il contatto fra matrice ferritica e sferoidi di grafite non è completo: si verifica una evidente deformazione plastica della matrice (Fig. 32). Tutte le morfologie di frattura sono sostanzialmente indipendenti dalle condizioni di applicazione della sollecitazione (R e/o  $\Delta K$ ).

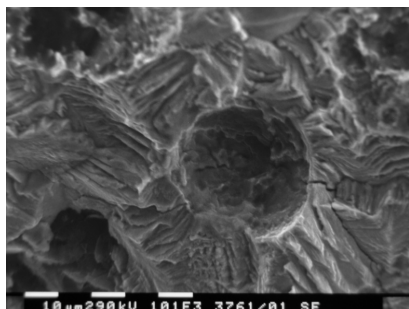


Figura 28: DCI ferritica  
(R = 0.1,  $\Delta K$  = 10 MPa $\sqrt{m}$ ).

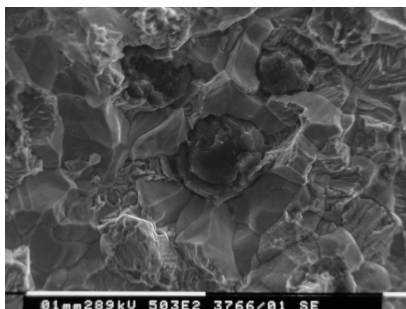


Figura 29: DCI ferritica  
(R = 0.1,  $\Delta K$  = 12 MPa $\sqrt{m}$ ).

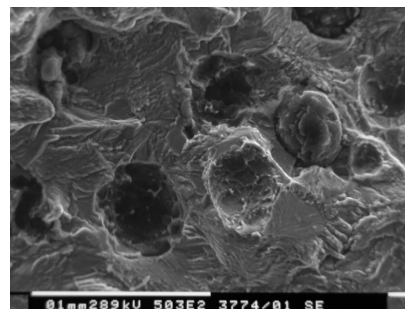


Figura 30: DCI ferritica  
(R = 0.1,  $\Delta K$  = 19 MPa $\sqrt{m}$ ).

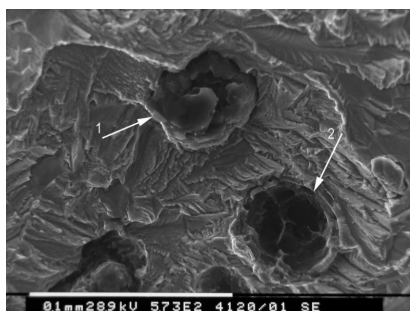


Figura 31: DCI ferritica  
(R = 0.5,  $\Delta K$  = 9 MPa $\sqrt{m}$ ).

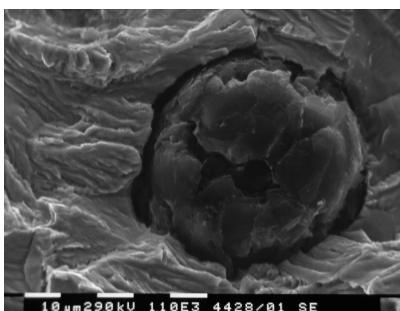


Figura 32: DCI ferritica  
(R = 0.75,  $\Delta K$  = 11 MPa $\sqrt{m}$ ).

L'analisi SEM delle superfici di frattura della ghisa sferoidale con matrice completamente perlitica non mostra la presenza di cricche secondarie, se non in casi molto rari e con estensione limitata a poche decine di micron (ad esempio, Fig. 33). La presenza di clivaggio è estremamente limitata, se non completamente assente (Fig. 34), mentre sono molto più evidenti delle striature di fatica. Tale definizione è probabilmente impropria. Infatti, piuttosto che di vere e proprie “striature” di fatica, si tratta di colonie di perlite fratturate come peraltro evidenziato nell'analisi del profilo di avanzamento (Fig. 20 - 21). Ne consegue che anche i rari “clivaggi” altro non sono che i segni della cricca che, per un breve percorso, ha “delaminato” le lamelle di perlite (confrontare la Fig. 19 con la Fig. 34). Per quanto riguarda il distacco degli sferoidi, questo avviene sempre senza lasciare residui nella cavità e senza disgregazione (Fig. 35). Il distacco (debonding) sferoidi-matrice perlitica non presenta alcuno dei caratteri di duttilità evidenziati nella ghisa a matrice ferritica.

Le superfici di frattura ottenute con la ghisa sferoidale ferrito-perlitica ottenuta mediante il controllo della composizione chimica presentano sovente clivaggio della ferrite che risulta essere localizzata intorno agli sferoidi di grafite (Fig. 36 e 37). Come nel caso della ghisa a matrice ferritica, gli sferoidi presentano una seppur minima disgregazione e distacco duttile dal guscio ferritico (Fig. 38), mentre, come nella ghisa perlitica, si evidenzia una pressoché completa mancanza di cricche secondarie. La matrice perlitica presenta l'evidenza di quelle “striature” che sono già state evidenziate nella ghisa sferoidale con matrice completamente perlitica: anche in questo caso, trattasi della frattura delle colonie perlitiche e solo molto raramente una eventuale “delaminazione” delle lamelle può risultare in una sorta di “clivaggio” non localizzato intorno agli sferoidi.



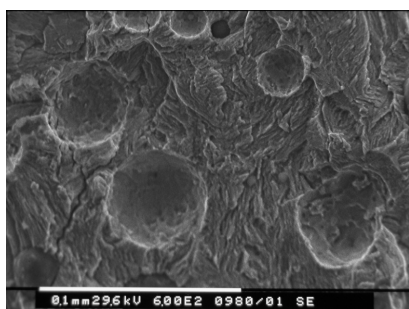


Figura 33: DCI perlite  
( $R = 0.5$ ,  $\Delta K = 10 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ).

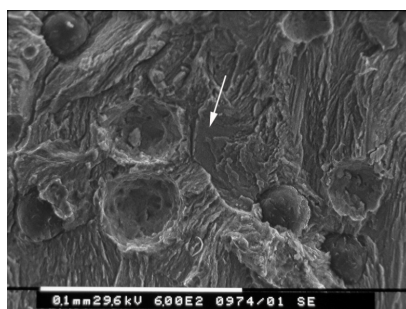


Figura 34: DCI perlite  
( $R = 0.75$ ,  $\Delta K = 8 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ).



Figura 35: DCI perlite  
( $R = 0.1$ ,  $\Delta K = 16 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ).

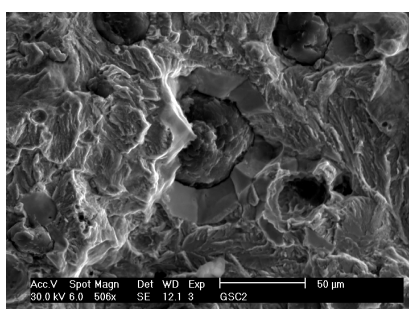


Figura 36: DCI ferrite-perlite  
( $R = 0.1$ ,  $\Delta K = 15 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ).

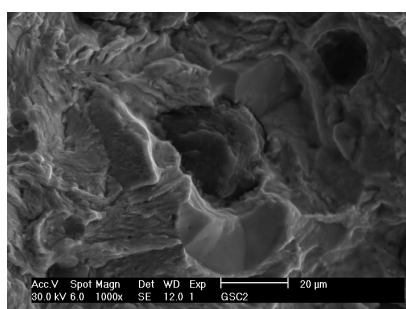


Figura 37: DCI ferrite-perlite  
( $R = 0.1$ ,  $\Delta K = 18 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ).

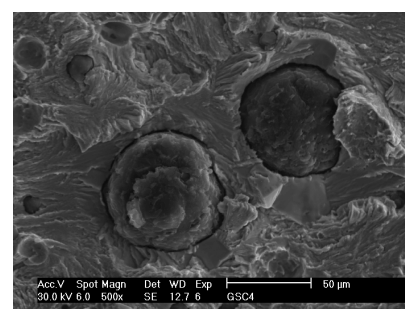


Figura 38: DCI ferrite-perlite  
( $R = 0.75$ ,  $\Delta K = 8 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ).

La ghisa sferoidale ferrite-perlitica ottenuta mediante ricottura di una ghisa con matrice perlitica presenta una distribuzione delle fasi differente rispetto a quella che caratterizza la ghisa sferoidale ferrite-perlitica ottenuta mediante il controllo della composizione chimica: la ferrite non risulta essere localizzata intorno agli sferoidi di grafite e la perlite non costituisce una sorta di “matrice legante”, ma, piuttosto, i due costituenti strutturali risultano essere notevolmente più mescolati. Il clivaggio della ferrite intorno agli sferoidi è quindi assente, mentre si osservano aree di clivaggio di estensione ridotta e più distribuite nella matrice metallica (Fig. 39). Gli sferoidi possono essere sia parzialmente disgregati (Fig. 39) che assolutamente integri (Fig. 40 e 41), con rare cricche secondarie di estensione limitata (Fig. 42). Anche in queste ghise è presente un certo distacco duttile fra sferoide e matrice metallica (Fig. 29-41).

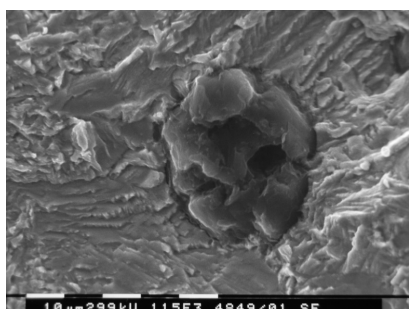


Figura 39: DCI ferrite-perlitica  
ottenuta mediante trattamento termico  
( $R = 0.5$ ,  $\Delta K = 6 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ).

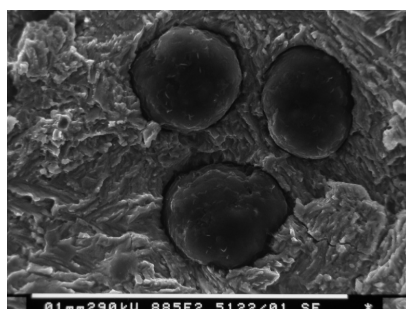


Figura 40: DCI ferrite-perlitica  
ottenuta mediante trattamento termico  
( $R = 0.75$ ,  $\Delta K = 7 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ).

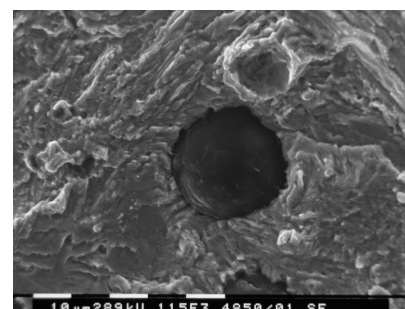


Figura 41: DCI ferrite-perlitica  
ottenuta mediante trattamento termico  
( $R = 0.1$ ,  $\Delta K = 12 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ).

La ghisa sferoidale austemperata, con la sua microstruttura prevalentemente bainitica e, quindi, più fine se comparata alle ferrite-perlitiche analizzate nelle pagine precedenti, può comunque presentare delle morfologie di laminazione simili a quelle precedentemente incontrate (Fig. 42). Gli sferoidi possono essere parzialmente disgregati (Fig. 42) anche se la morfologia più frequentemente osservata consiste in sferoidi sostanzialmente integri (Fig. 43 e 44), con un evidente distacco duttile sferoidi-matrice metallica. Le cricche secondarie sono sostanzialmente assenti, oppure di dimensioni estremamente ridotte (Fig. 43).

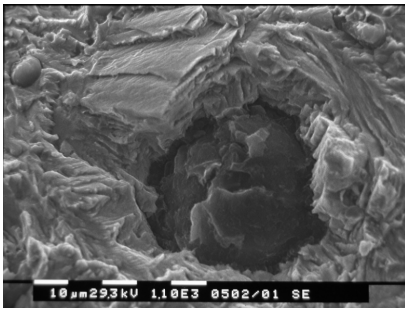


Figura 42: DCI austemperata  
( $R = 0.5$ ,  $\Delta K = 12 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ).

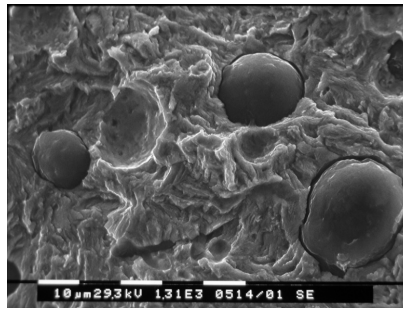


Figura 43: DCI austemperata  
( $R = 0.1$ ,  $\Delta K = 6 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ).

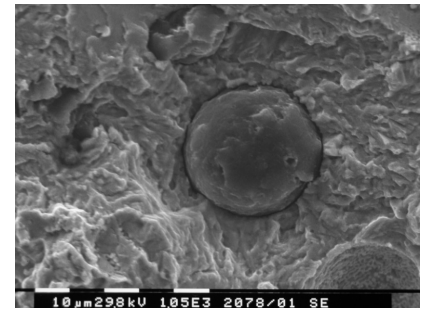


Figura 44: DCI austemperata  
( $R = 0.1$ ,  $\Delta K = 18 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ).

### Analisi LOM dei profili di frattura

Nel caso delle foto che seguono, il profilo della cricca viene analizzato al microscopio ottico mediante sezioni trasversali di campioni nichelati e preparati metallograficamente.

Nel caso della ghisa ferritica, l'analisi al microscopio ottico (LOM) delle sezioni trasversali della superficie della cricca conferma la frequente frantumazione degli sferoidi (Fig. 45 e 46). Anche nel caso di sferoidi completamente asportati, si osserva spesso nella sede della cavità la presenza di residui di grafite (Fig. 47). I tratti rettilinei del profilo testimoniano l'importanza del clivaggio nella superficie di frattura per tutte le condizioni di applicazione della sollecitazione.

L'analisi LOM della ghisa sferoidale con matrice completamente perlitica evidenzia, e conferma, un distacco sferoide-grafite di tipo fragile, senza evidente frantumazione degli sferoidi e con cavità prive di residui di grafite, indipendentemente dal  $\Delta K$  applicato (Fig. 48-50).

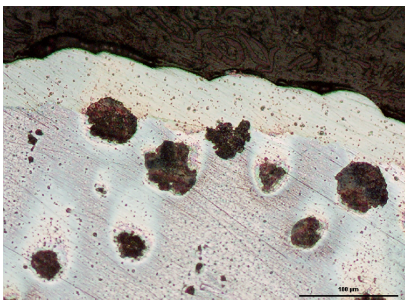


Figura 45: DCI ferritica  
( $R = 0.1$ ,  $\Delta K = 15 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ).

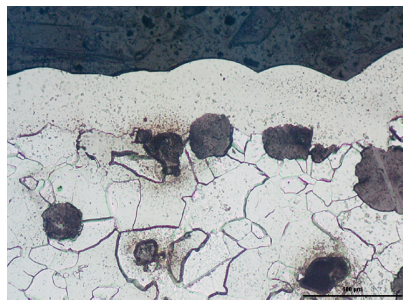


Figura 46: DCI ferritica  
( $R = 0.5$ ,  $\Delta K = 15 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ).

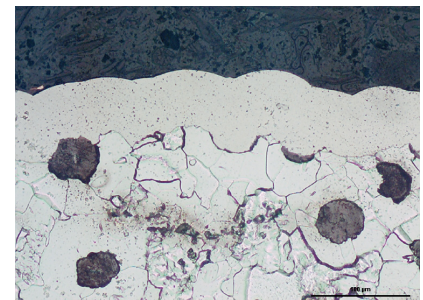


Figura 47: DCI ferritica  
( $R = 0.5$ ,  $\Delta K = 10 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ).

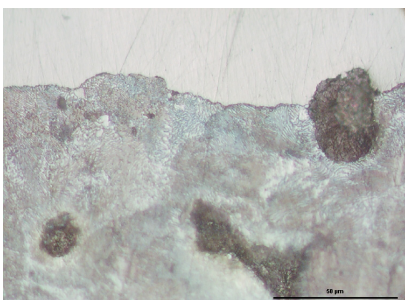


Figura 48: DCI perlitica  
( $R = 0.1$ ,  $\Delta K = 10 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ).

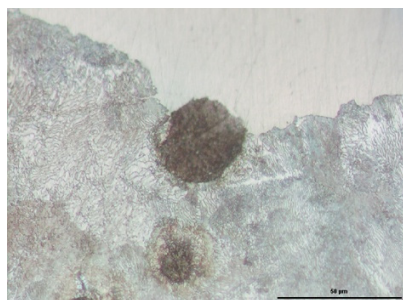


Figura 49: DCI perlitica  
( $R = 0.1$ ,  $\Delta K = 15 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ).

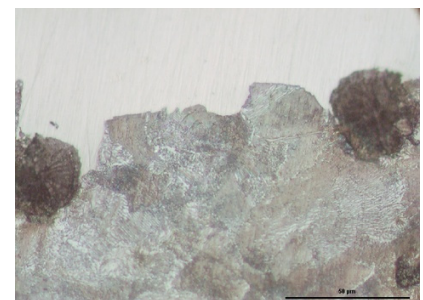


Figura 50: DCI perlitica  
( $R = 0.1$ ,  $\Delta K = 20 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ).

La ghisa ferrito-perlitica ottenuta mediante il controllo della composizione chimica presenta sferoidi sia integri che parzialmente frantumati (Fig. 51), con cavità che possono presentare residui di grafite. La presenza degli sferoidi circondati dai gusci di grafite non costituisce necessariamente un percorso preferenziale per l'avanzamento della cricca, come è possibile evidenziare nel caso dello sferoide al centro della Fig. 52: gli sferoidi che non sono incontrati dalla cricca dal suo avanzamento, anche se prossimi alla cricca medesima, non presentano un evidente danneggiamento (ad esempio, sotto



forma di cricche secondarie). Gli sferoidi possono rimanere a contatto con il guscio ferritico anche nel caso in cui la superficie di contatto risulti inferiore al 50% della superficie dello sferoide (Fig. 51 e 53).

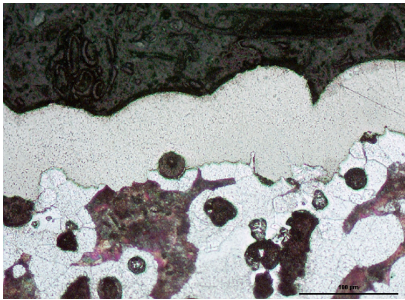


Figura 51: DCI ferrito-perlitica  
( $R = 0.5, \Delta K = 9 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ).

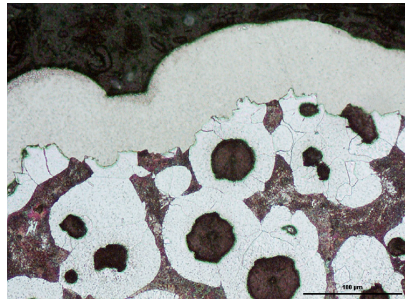


Figura 52: DCI ferrito-perlitica  
( $R = 0.1, \Delta K = 15 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ).

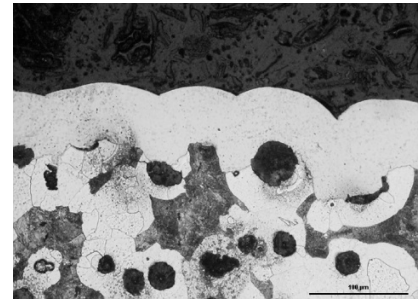


Figura 53: DCI ferrito-perlitica  
( $R = 0.1, \Delta K = 20 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ).

Nel caso della ghisa sferoidale ferrito-perlitica ottenuta mediante trattamento termico, si può osservare una densità di sferoidi parzialmente frantumati più elevata rispetto alla ghisa sferoidale ferrito-perlitica ottenuta controllando la composizione chimica (Fig. 54). Sono comunque presenti numerosi sferoidi non frantumati, distaccati dalla superficie di frattura secondo un meccanismo fragile, senza deformazione plastica evidente della matrice (Fig. 55 e 56).

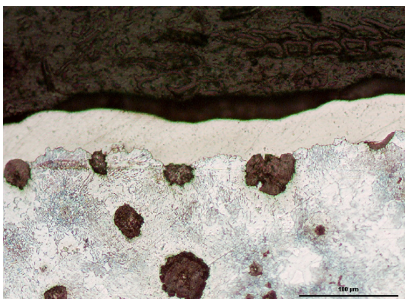


Figura 54: DCI ferrito-perlitica ottenuta  
mediante trattamento termico  
( $R = 0.1, \Delta K = 10 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ).

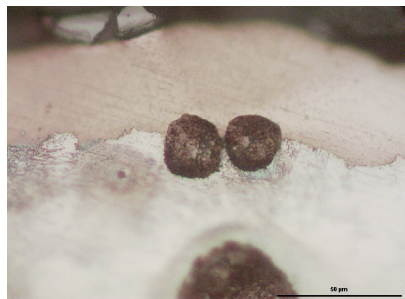


Figura 55: DCI ferrito-perlitica ottenuta  
mediante trattamento termico  
( $R = 0.1, \Delta K = 15 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ).

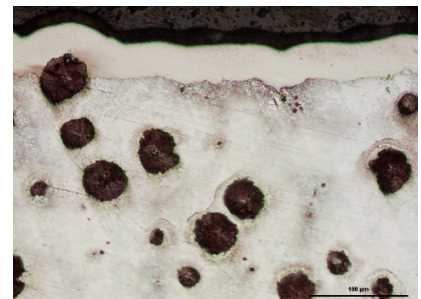


Figura 56: DCI ferrito-perlitica ottenuta  
mediante trattamento termico  
( $R = 0.1, \Delta K = 20 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ).

La ghisa austemperata presenta anch'essa sferoidi completamente integri (Fig. 57), oppure frantumati (Fig. 58). Il guscio intorno agli sferoidi non è costituito esclusivamente da ferrite, ma è sempre bene evidente. Come nel caso della ghisa ferrito-perlitica ottenuta controllando la composizione chimica, gli sferoidi possono rimanere a contatto con la matrice metallica anche nel caso in cui la superficie di contatto risulti inferiore al 50% della superficie dello sferoide (Fig. 59).

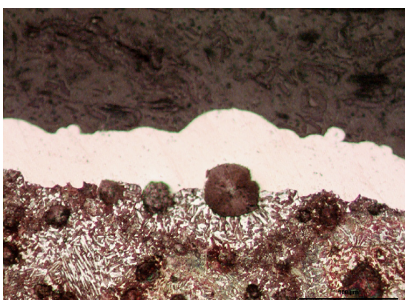


Figura 57: DCI austemperata  
( $R = 0.1, \Delta K = 15 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ).

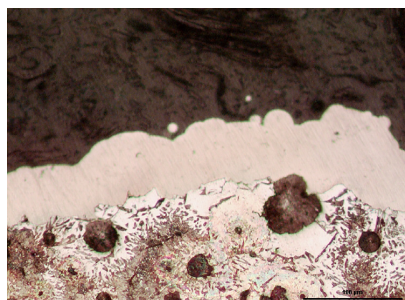


Figura 58: DCI austemperata  
( $R = 0.1, \Delta K = 9 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ).

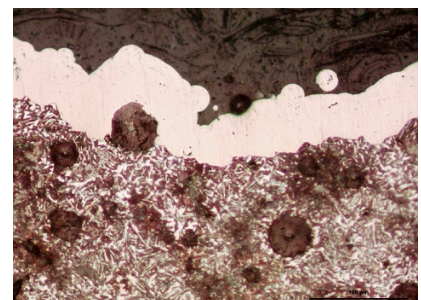


Figura 59: DCI austemperata  
( $R = 0.1, \Delta K = 20 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ).

### Commenti

L'analisi della resistenza alla propagazione della cricca di fatica delle ghise sferoidali effettuata in questo lavoro ha permesso di evidenziare come, al fine di ottenere una implementazione di tale resistenza, oltre all'ovvia importanza di una





elevata nodularità degli elementi di grafite, sia necessario ottimizzare la microstruttura. L'importanza della microstruttura della matrice metallica non è esclusivamente legata alla tipologia delle fasi presenti ma anche alle loro frazioni volumetriche ed alla loro distribuzione. L'intervento della microstruttura della matrice non è solo legata alla sua propria intrinseca resistenza alla propagazione della cricca di fatica, ma anche alle possibili interazioni con gli sferoidi di grafite. Dalle evidenze sperimentali ottenute in questo lavoro, si può evidenziare come gli sferoidi di grafite non siano una mera "soluzione di continuità della matrice metallica" e non agiscano esclusivamente come "crack arresters", grazie alla loro forma peculiare che riduce notevolmente l'intensificazione delle sollecitazioni, ma piuttosto possano, in taluni casi, migliorare la resistenza alla propagazione della cricca di fatica. L'azione principale risulta legata all'incremento dell'importanza dell'effetto di chiusura, con una conseguente diminuzione del  $\Delta K$  che effettivamente sull'apice della cricca ( $\Delta K_{eff}$ ).

Fra i principali meccanismi osservati su tutte le ghise investigate, il distacco (debonding) degli sferoidi dalla matrice metallica duttile o fragile è forse il principale. Nel caso di un distacco privo di deformazione plastica si può parlare di "distacco fragile", mentre nel caso di una deformazione plastica della matrice si può parlare di "distacco duttile". Il carattere "duttile" oppure "fragile" del distacco degli sferoidi, e la sua interazione con la cricca, può essere riassunta nella Fig. 60.

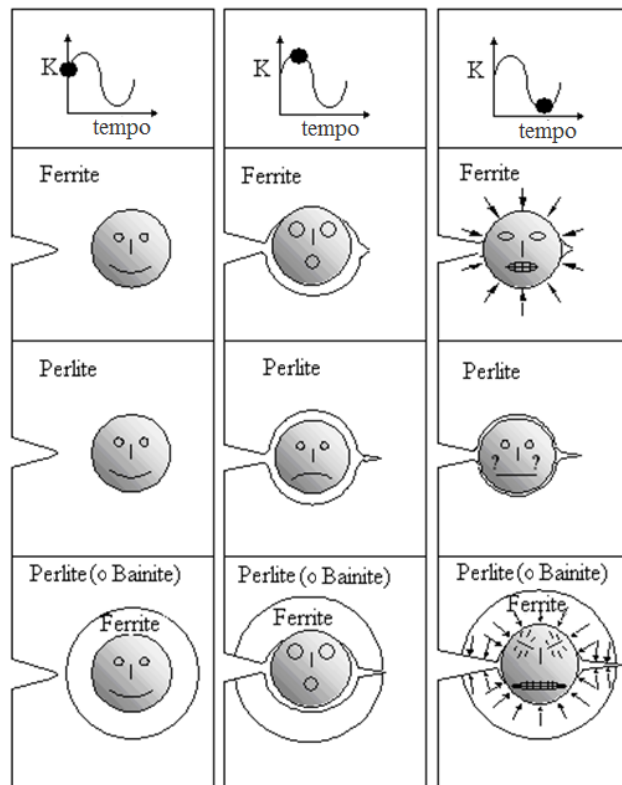


Figura 60: Influenza della microstruttura sul debonding sferoidi di grafite – matrice.

Nel caso delle ghise sferoidali con matrice completamente ferritica oppure completamente perlitica, il ruolo svolto dagli sferoidi è piuttosto semplice: nel caso della matrice ferritica la deformazione plastica che ha luogo durante il distacco dello sferoide impedisce una completa chiusura della cricca in corrispondenza del  $K_{min}$ . Ne consegue un effetto di chiusura legato ad un semplice "impedimento meccanico". Tale meccanismo risulta avere una importanza decisamente ridotta nel caso della matrice completamente perlitica, nella quale il distacco fragile non implica deformazione plastica della matrice. Di conseguenza, le velocità di propagazione macroscopiche nel caso della ghisa ferritica risultano inferiori rispetto alla ghisa perlitica, in particolare per valori più elevati di R e  $\Delta K$ .

Le ghise ferrito-perlitiche (ottenuta controllando la composizione chimica) ed austemperate sono caratterizzate da una analoga distribuzione delle fasi, con una matrice perlitica o bainitica e la ferrite a formare gusci intorno agli sferoidi (più evidenti nella ghisa ferrito-perlitica). Considerando che sia la perlite che la bainite sono caratterizzate da una duttilità inferiore alla ferrite e da valori più elevati dello snervamento, è possibile proporre un secondo meccanismo di chiusura che



si aggiunge a quello precedentemente descritto come un mero impedimento meccanico alla chiusura della cricca (simile, per intendersi, al ruolo svolto da eventuali ossidi sulla superficie di frattura): tale meccanismo è legato alla peculiare distribuzione delle fasi ed al loro differente comportamento meccanico. Durante il ciclo di fatica, il livello di deformazione nella ferrite e nella perlite (oppure nella bainite), può essere molto diverso, specialmente nel caso di elevate valori di  $R$  e di  $\Delta K$ :

- ✓ In corrispondenza del  $K_{max}$ , i gusci di ferrite sono molto più deformati rispetto alla matrice perlitica (o bainitica);
- ✓ In corrispondenza di valori di  $K$  prossimi al  $K_{min}$ , la matrice perlitica (oppure bainitica) induce sui gusci di ferrite (e quindi sugli sferoidi di grafite) una stato di sollecitazioni di compressione, con un conseguente incremento dell'importanza dell'effetto di chiusura.

La conferma di questo meccanismo è data dal comportamento della ghisa sferoidale ferrito-perlitica ottenuta mediante trattamento termico: in questo caso, la ferrite non è localizzata a formare dei gusci di ferrite. La resistenza alla propagazione della cricca di fatica risulta essere quindi più vicina alla ghisa perlitica, piuttosto che alla ferrito-perlitica ottenuta mediante il controllo della composizione chimica (con la ferrite localizzata intorno agli sferoidi).

Ulteriori approfondimenti sicuramente saranno in futuro dedicati all'analisi dei meccanismi di disgregazione degli sferoidi e di nucleazione e propagazione delle cricche secondarie nella matrice, considerando naturalmente l'influenza su tali meccanismi della matrice.

## CONCLUSIONI

In questo lavoro sono riportati i risultati ottenuti negli ultimi anni dal gruppo di Metallurgia dell'Università di Cassino nella caratterizzazione dei micromeccanismi di avanzamento delle cricche di fatica nelle ghise sferoidali. In particolare, è stato approfondito il ruolo della microstruttura e delle condizioni di sollecitazione ( $\Delta K$  applicato ed  $R$ ). Nel presente lavoro si è focalizzata l'attenzione su quattro ghise ferrito-perlitiche e su una ghisa austemperata e diverse procedure sperimentali sono state utilizzate per analizzare le modalità di interazione della cricca di fatica con la microstruttura della matrice metallica e con gli sferoidi di grafite:

- ✓ osservazione al microscopio elettronico a scansione (SEM) della superficie laterale del provino durante l'avanzamento della cricca di fatica (con interruzione della prova di propagazione della cricca di fatica).
- ✓ analisi SEM di tipo "tradizionale" delle superfici di frattura;
- ✓ analisi dei profili di frattura mediante osservazione al microscopio ottico (LOM) di sezioni trasversali nichelate e preparate metallograficamente.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] C. Labrecque, M. Gagne, *Canadian Metallurgical Quarterly*, 37 (1998) 343.
- [2] R.G. Ward, *An Introduction to the Physical Chemistry of Iron and Steel Making*, Arnold, London (1962).
- [3] K. Tokaji, T. Ogawa, K. Shamoto, *Fatigue*, 16 (1994) 344.
- [4] K. Selby, *Int. J. of Fatigue*, 12 (1982) 124.
- [5] F.D. Griswold Jr., R.I. Stephens, *Int. J. of Fatigue* 1 (1987) 3.
- [6] K. Tokaji, T. Ogawa, K. Shamoto, *Fatigue*, 16 (1994) 344.
- [7] G.L. Greno, J.L. Otegui, R.E. Boeri, *Int. J. of Fatigue*, 21 (1999) 35.
- [8] J. Pokluda, J. Svejcar, In: *Fatigue 99*, Pechino (1999) 487.
- [9] J. Zuidema, L. Wijnmaalen, C. van Eldijk in *Fatigue 99*, Pechino (1999) 2071.
- [10] P. Hübner, H. Schlosser, G. Pusch, H. Biermann, *Int. J. of Fatigue*, 29 (2007) 1788.
- [11] F. Iacoviello, W. Polini, *La Metallurgia Italiana*, 7-8 (2000) 31.
- [12] F. Iacoviello, M. Cavallini, In: *28° Convegno Nazionale AIM*, Milano (2000) 1029.
- [13] F. Iacoviello, M. Cavallini, *La Metallurgia Italiana*, 1 (2003) 31.
- [14] F. Iacoviello, V. Di Cocco, In: *International Conference on Fatigue Crack Paths*, Parma (2003), 116
- [15] F. Iacoviello, O. Di Bartolomeo, M. Cavallini, In: *Convegno Nazionale AIM*, Vicenza (2004), 19.
- [16] M. Cavallini, O. Di Bartolomeo, F. Iacoviello, In: *International Conference on Crack Paths (CP2006)*, Parma (2006) 13.



- [17] M. Cavallini, A. De Santis, O. Di Bartolomeo, D. Iacoviello, F. Iacoviello, In: 31° Convegno Nazionale AIM, Milano (2006) 31.
- [18] V. Di Cocco, F. Iacoviello, F. Franzese, In: Convegno IGFXIX, Milano (2007) 7.
- [19] M. Cavallini, O. Di Bartolomeo, F. Iacoviello, *Engineering Fracture Mechanics*, 75 (2008) 694.
- [20] V. Di Cocco, F. Iacoviello, F. Franzese, In: XXXII Convegno Nazionale AIM, Ferrara (2008) 38.
- [21] F. Iacoviello, V. Di Cocco, F. Franzese, In: Convegno IGFX, Torino (2009).
- [22] 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