



Fatigue crack propagation micromechanisms in a ferritic ductile iron

Micromeccanismi di propagazione della cricca di fatica in una ghisa sferoidale ferritica

V. Di Cocco, F. Iacoviello, A. Rossi

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

iacoviello@unicas.it

M. Cavallini, S. Natali

Università di Roma “Sapienza”, DICMA, via Eudossiana 18, Roma

ABSTRACT. Ductile cast irons (DCIs) are able to combine the toughness of steels with the good castability of gray irons. They are widely used in a number of applications, e.g. wheels, gears, crankshafts in cars and trucks etc. DCIs fatigue crack propagation resistance depends on loading conditions, chemical composition, matrix microstructure and graphite elements morphology (graphite volume fraction, graphite elements nodularity, graphite elements distribution and dimension). In this work, a ferritic DCI was investigated focusing fatigue crack propagation micromechanisms: step by step fatigue crack propagation tests were performed considering Compact Type specimens and micromechanisms were investigated by means of Scanning Electron Microscope (SEM) lateral surface observation.

SOMMARIO. Le ghise sferoidali combinano caratteristiche come la tenacità, propria degli acciai con una buona colabilità, tipica delle ghise grigie. Queste sono largamente utilizzate in numerose applicazioni, quali ruote dentate ingranaggi, alberi a gomito in auto e camion. In queste leghe, la resistenza alla propagazione della cricca di fatica è influenzata dalla composizione chimica, dalla microstruttura della matrice metallica e dalle caratteristiche morfologiche degli elementi di grafite (frazione volumetrica, dimensioni, distribuzione e nodularità), oltre che dalle condizioni di sollecitazione. In questo lavoro sono stati investigati i micromeccanismi di propagazione della cricca di fatica in una ghisa sferoidale ferritica: sono state effettuate delle prove di propagazione della cricca di fatica utilizzando dei provini CT, effettuando alcune interruzioni della prova al fine di osservare la superficie laterale dei provini al microscopio elettronico a scansione (SEM).

KEYWORDS. Ductile iron; Fatigue crack propagation; Damaging micromechanisms.

INTRODUZIONE

Le ghise sferoidali sono caratterizzate da notevoli proprietà meccaniche e da un costo ridotto e costituiscono una valida alternativa all'impiego delle ghise malleabili e di altre leghe ferrose. Queste sono caratterizzate dalla presenza di elementi di grafite in forma nodulare e ciò consente di ottenere un deciso miglioramento delle proprietà

meccaniche, conservando le migliori caratteristiche delle ghise, fra cui la colabilità. Un attento controllo della composizione chimica e del processo di produzione consente di ottenere tale risultato, con un'importante diminuzione dei costi di produzione rispetto alle più tradizionali ghise malleabili. Negli ultimi decenni sono stati ottimizzati differenti trattamenti termici e differenti composizioni chimiche, in modo da controllare la microstruttura della matrice (Fig.1) ed ottenere, quindi, differenti combinazioni delle proprietà meccaniche: si possono ricordare le ghise sferoidali ferritiche, ferrito-perlitiche, perlitiche, bainitiche, "austemperate" etc. [1, 2]. 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 un'elevata durezza. Le ghise sferoidali austemperate, di più recente ottimizzazione, offrono una resistenza all'usura elevatissima ed un'ottima resistenza a fatica [1, 6]. Le differenti tipologie di ghise sferoidali sono attualmente utilizzate per la produzione di numerosi manufatti quali ruote, ingranaggi, alberi a gomito, tubazioni, corpi compressore, valvole, cilindri, corpi pompa, cuscinetti etc.

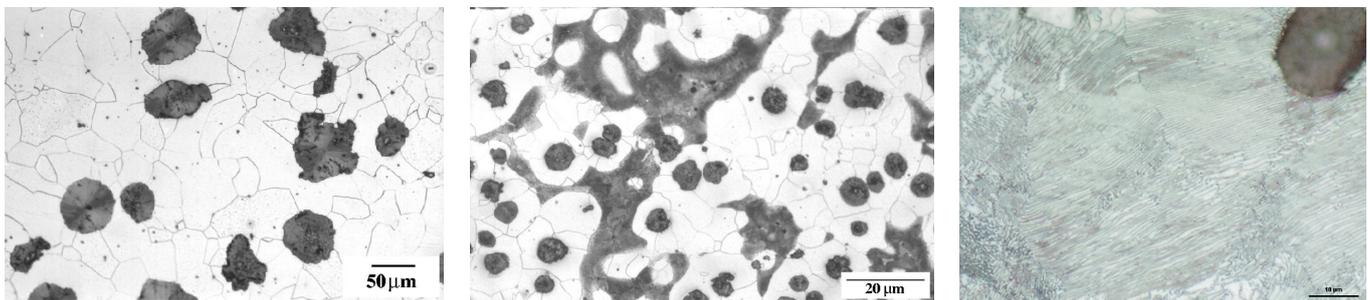


Figura 1: Ghise sferoidali ferrito-perlitiche. Da sinistra verso destra: ferritica, ferrito-perlitica, perlitica.

Figure 1: Ferritic-pearlitic DICs. From left: ferritic, ferritic-pearlitic and pearlitic matrix.

Precedenti attività sperimentali [7-10] sono state dedicate all'analisi dell'influenza della microstruttura sulla resistenza alla propagazione della cricca di fatica: i risultati ottenuti hanno permesso di ipotizzare alcuni meccanismi di interazione fra la cricca e gli elementi di grafite. In particolare, è stato possibile evidenziare che il ruolo svolto dagli sferoidi di grafite differisce in base alla microstruttura della matrice e, focalizzando l'attenzione sulle ghise sferoidali ferritiche, è possibile osservare un distacco degli sferoidi dalla matrice con sfaldatura dei primi ed evidenti "residui" di grafite sulla superficie di frattura. Inoltre, la ghisa sferoidale ferritica forma cricche secondarie piuttosto corte che solitamente si ricongiungono con il percorso principale.

In questo lavoro il meccanismo di propagazione della cricca di fatica viene ulteriormente approfondito mediante prove di propagazione della cricca di fatica ed osservazione della superficie laterale del provino al microscopio elettronico a scansione (SEM). Le medesime analisi al SEM sono state effettuate sui provini sottoposti a cicli di sovrasollecitazione in modo da meglio analizzare i micromeccanismi di danneggiamento.

MATERIALE INVESTIGATO E METODOLOGIE SPERIMENTALI

La ghisa investigata è caratterizzata da una matrice completamente ferritica (Tab.1) ed è caratterizzata da una elevata nodularità degli elementi di grafite.

Le prove di propagazione della cricca di fatica sono state effettuate in aria, in accordo alla normativa ASTM E647 [11], utilizzando provini CT di 10 mm di spessore e considerando un rapporto di carico ($R = K_{min}/K_{max}$) pari a 0.1. 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. In precedenti campagne di prove [7-10] è stato possibile verificare l'elevata ripetibilità dei risultati delle prove di fatica: in ogni caso, le prove sono state ripetute cinque volte. Le misure di avanzamento della cricca sono state effettuate in maniera continua mediante estensimetro meccanico e controllate a campione mediante microscopio ottico (x40).

Ulteriori prove di propagazione della cricca di fatica sono state effettuate applicando al provino delle sovrasollecitazioni con un K_{max} pari a $25 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$. I provini così sollecitati sono stati osservati in prossimità dell'apice della cricca sia al SEM



che al microscopio ottico (LOM), considerando quella che, in accordo ai principi della meccanica della frattura, dovrebbe essere la zona plasticizzata.

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 investigata.

Table 1: Investigated DCI chemical composition.

RISULTATI E COMMENTI

L'elevata ripetibilità dei risultati delle prove di propagazione della cricca di fatica effettuati sulle ghise sferoidali ferrite perlitiche già osservata in precedenti campagne di prove, viene confermata anche dai risultati ottenuti in questa attività sperimentale (Fig. 2).

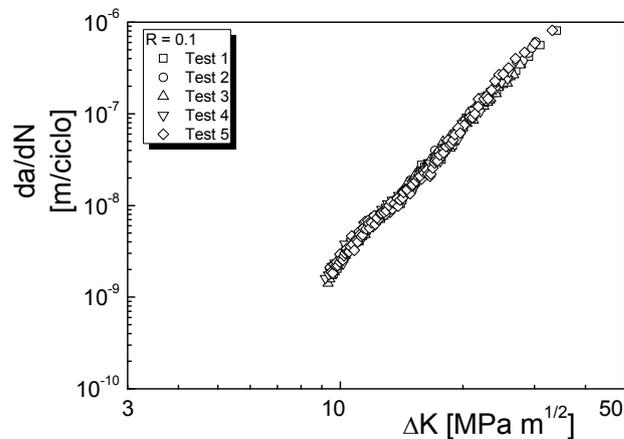


Figure 2: Resistenza alla propagazione di una cricca di fatica in una ghisa sferoidale ferritica (R = 0.1).

Figure 2: Fatigue crack propagation resistance in a ferritic DCI (R = 0.1).

I risultati dell'analisi SEM del profilo di propagazione dipendono dalle condizioni di sollecitazione, ovvero, considerando che le prove sono svolte per $R = 0.1$, dal valore del ΔK applicato. Nel caso di bassi valori del ΔK (circa $10 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$), la cricca di fatica non genera cricche secondarie se non di estensione estremamente limitata (pochi micron, Fig. 3). Gli sferoidi vengono superati sempre con una sorta di "aggiramento" che spesso vede un parziale distacco della grafite dallo sferoide stesso (con la presenza di grafite residua nella sede, Fig. 3), ma che può anche comportare un distacco netto sferoide-grafite, detto anche "debonding" (Fig. 4). E' anche possibile osservare la presenza di danneggiamento, sia nella matrice che negli sferoidi, lontano dal percorso della cricca di fatica (Fig 5).

Le condizioni di ΔK prossime a quelle di soglia sono quelle che più si avvicinano alle condizioni "ideali" della Meccanica della Frattura Lineare Elastica. Ipotizzando un materiale omogeneo, ad esempio un acciaio ferritico (ovviamente privo di sferoidi di grafite), l'applicazione di un ΔK di $9 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, con $R = 0.1$, comporterebbe all'apice della cricca un raggio della zona plastica in corrispondenza del K_{max} compreso fra circa 250 ed $85 \mu\text{m}$, valori corrispondenti rispettivamente alle condizioni di sforzo piano e di deformazione piana e confrontabili con le dimensioni degli sferoidi di grafite. Considerando che, dai risultati delle analisi dei meccanismi di danneggiamento per sollecitazione a trazione [12-17], gli sferoidi non possono essere assimilati a semplici microvuoti in una matrice ferritica, ne consegue che in corrispondenza di valori di ΔK prossimi alla soglia la presenza degli sferoidi di grafite comporta una redistribuzione delle sollecitazioni che potrebbe anche rendere problematica l'utilizzazione del K come parametro descrittivo dello stato di sollecitazione all'apice della cricca. La propagazione della cricca di fatica è quindi influenzata in maniera importante dagli sferoidi di grafite: quando la cricca di fatica ne incontra uno, questo è sostanzialmente comparabile con le dimensioni della zona plastica

generata dal K_{max} , e la redistribuzione delle sollecitazioni che ne consegue comporta una deviazione della cricca medesima intorno allo sferoide.

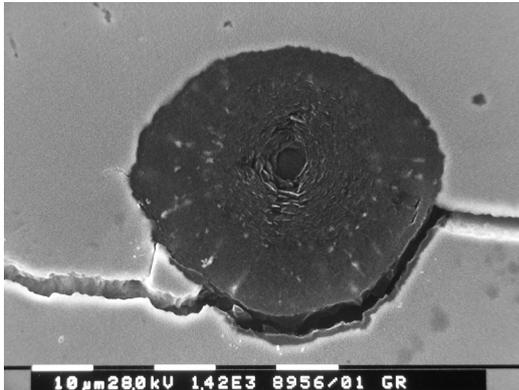


Figura 3: Distacco di grafite dallo sferoide (con grafite residua nella sede).

Figure 3: Graphite core-graphite-shield debonding (with residual graphite).

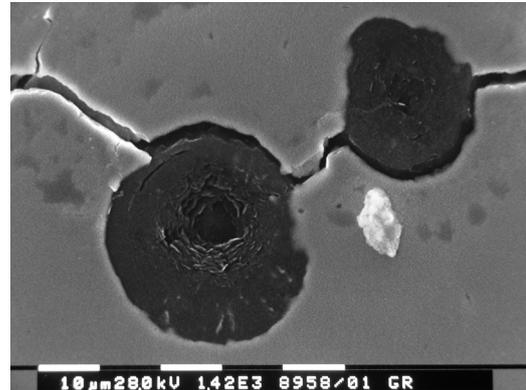


Figura 4: “Debonding” Grafite – matrice e danneggiamento interno allo sferoide.

Figure 4: Graphite nodule – matrix debonding and graphite nodule internal damaging.

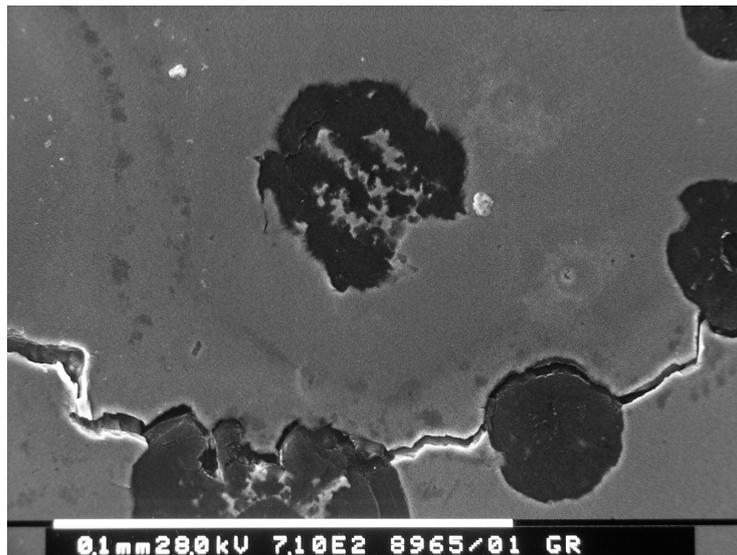


Figura 5: Sferoide danneggiato (lontano dal percorso della cricca).

Figure 5: Damaged nodule (far from the crack path).

Aumentando il ΔK applicato, i meccanismi di avanzamento della cricca di fatica cambiano, con una modifica delle modalità di interazione della cricca con gli sferoidi. Sono presenti cricche secondarie di dimensioni più rilevanti di quelle osservate nella zona di soglia (Fig. 6), che comunque tendono a raggiungere nuovamente il percorso principale, e gli sferoidi vengono a volte attraversati dalla cricca medesima (Fig. 7).

L'osservazione LOM e SEM dell'apice della cricca sottoposto ad una sovrasollecitazione ha messo in evidenza i micromeccanismi di danneggiamento conseguenti.

E' possibile osservare che una sollecitazione decisamente elevata, tale da generare un K_{max} decisamente più elevato del K_{max} applicato durante il ciclo di fatica, non comporta nelle ghise sferoidali ferritiche una plasticizzazione dell'apice della cricca, quanto piuttosto un diffuso danneggiamento in un raggio piuttosto ampio, dipendente dall'entità della sovrasollecitazione (Fig. 8). Per avere una visione d'insieme della zona danneggiata è risultato più utile il LOM, mentre per osservare i dettagli è stato utilizzato il SEM. Le dimensioni della zona danneggiata sono di difficile determinazione, ma



sembrano approssimativamente simili alle dimensioni della zona plasticizzata calcolabile utilizzando i principi della meccanica della frattura, ipotizzando un materiale omogeneo ed isotropo (Fig. 8).



Figura 6: Cricca secondaria.

Figure 6: Secondary crack.

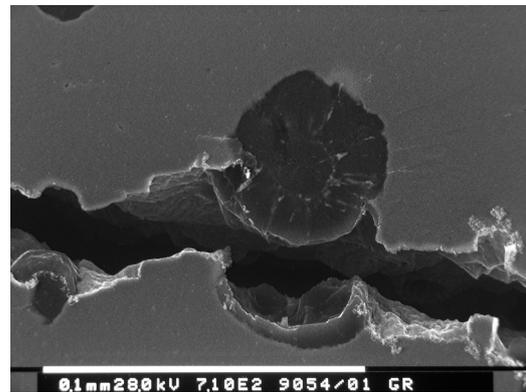


Figura 7: Danneggiamento sferoide.

Figure 7: Nodule damaging.

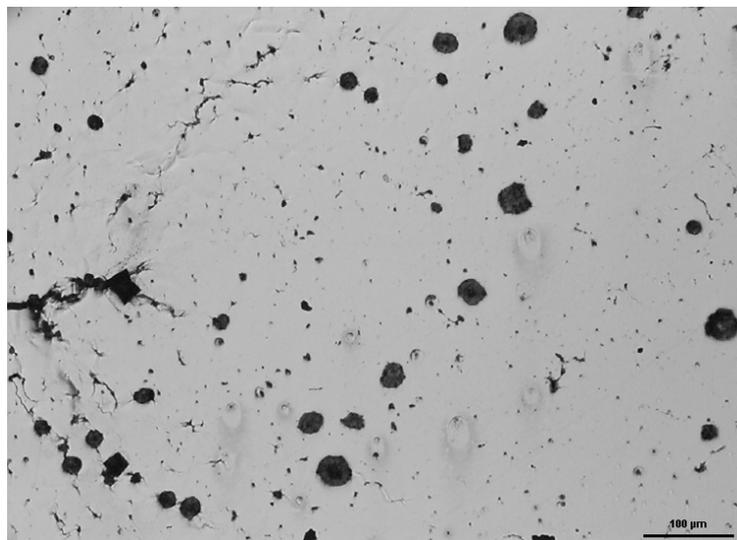


Figura 8: Zona danneggiata in prossimità dell'apice della cricca (LOM, sono anche evidenti alcune impronte di microdurezza, non commentate nel presente lavoro).

Figure 8: Damaging near the crack tip (LOM observation).

Si possono osservare cricche estese sia nella matrice che negli sferoidi, che si dipartono a partire dall'apice della cricca, approssimativamente a 45° rispetto alla direzione di applicazione della sollecitazione (Fig. 9), e che, al crescere della distanza dall'apice, divengono sempre più piccole ed approssimativamente parallele alla direzione di propagazione della cricca di fatica. Tale andamento è evidente nella Fig. 10, ottenuta dopo aver nuovamente fatto propagare la cricca di fatica dopo la sovrasollecitazione.

E' necessario sottolineare che tale comportamento è già stato riportato in letteratura, anche con video di notevolissimo interesse [18]. Quello che preme agli autori del presente lavoro è di sottolineare come l'intensificazione degli sforzi K , nel caso delle ghise sferoidali ferritiche, vada preso in considerazione con attenzione e sia da considerarsi come valido solo sotto condizioni più stringenti di quelle normalmente considerate come valide nella MFLE. Infatti, a completamento delle considerazioni sopra riportate, si deve anche considerare il fatto che, nel caso di condizioni di sollecitazione a fatica tali da generare valori elevati di K_{max} (ovvero valori elevati di R e/o ΔK), il raggio di plasticizzazione conseguente può arrivare ad alcuni millimetri: nel caso del provino CT utilizzato nella presente sperimentazione ciò implica un mancato rispetto dei principi della MFLE e, di conseguenza, una mancanza di validità dei risultati ottenuti. Come riportato nelle righe precedenti, nelle ghise sferoidali ferritiche non si viene nemmeno a formare una zona plasticizzata, ma piuttosto una zona

ad elevato danneggiamento che sicuramente invalida il K come parametro atto a descrivere lo stato tensionale all'apice della cricca.

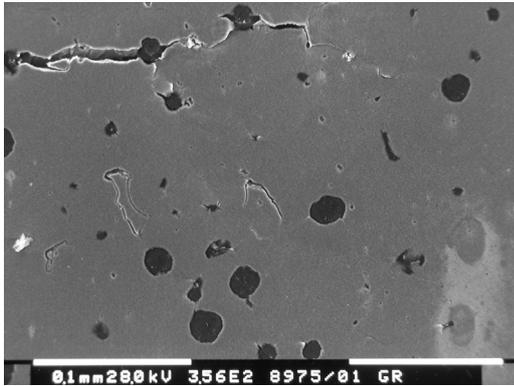


Figura 9: Danneggiamento in prossimità dell'apice della cricca di fatica (dopo sovrasollecitazione, SEM).

Figure 9: Damaging near the crack tip (after an overload, SEM).

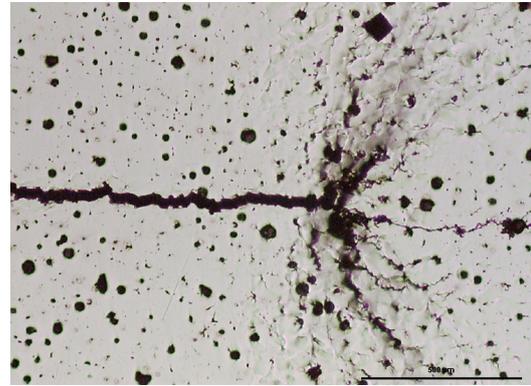


Figura 10: Danneggiamento a seguito di una sovrasollecitazione di una cricca di fatica.

Figure 10: Damaging near the crack tip (after an overload, LOM).

CONCLUSIONI

Nel presente lavoro sono stati analizzati i micromeccanismi di avanzamento della cricca di fatica in una ghisa sferoidale, focalizzando l'attenzione sull'influenza degli sferoidi di grafite e riconsiderando criticamente l'impiego del fattore di intensificazione delle sollecitazioni come parametro utile per la caratterizzazione dello stato tensionale nelle ghise sferoidali ferritiche, in presenza di cricche. Dai risultati sperimentali ottenuti, e dalle considerazioni sviluppate, è possibile riassumere che:

- l'influenza degli sferoidi di grafite sulla propagazione della cricca di fatica è importante e dipende dalle condizioni di sollecitazione;
- nel caso di valori bassi del K_{max} , la zona plasticizzata diviene confrontabile con le dimensioni degli sferoidi, che fungono da "deviatori" della cricca di fatica;
- nel caso di valori più elevati del K_{max} , il materiale può essere considerato come omogeneo e gli sferoidi vengono frantumati dalla cricca, con formazione di cricche secondarie nella matrice.
- nel caso di sovrasollecitazioni, non si viene a generare una zona plastica con una dimensione dipendente dal K_{max} applicato, ma si viene a formare una zona danneggiata, con cricche aventi un'orientazione variabile, da circa 45° rispetto alla direzione di applicazione della sollecitazione (in prossimità dell'apice cricca), fino ad essere sostanzialmente parallele alla direzione di propagazione della cricca principale (lontano dall'apice della cricca).

Concludendo, la mancata omogeneità della ghisa sferoidale (specialmente per bassi valori di ΔK) e la formazione di una zona danneggiata all'apice della cricca con numerosissime cricche secondarie caratterizzate da orientamenti diversi a seconda della posizione rende necessaria una approfondita riconsiderazione del K come parametro utile nella caratterizzazione della resistenza alla propagazione delle cricche di fatica nelle ghise sferoidali.

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] V. Di Cocco, F. Iacoviello, F. Franzese, *Atti del Convegno IGFX, Torino, (2009)* 3.
- [11] 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).
- [12] F. Iacoviello, V. Di Cocco, V. Piacente, O. Di Bartolomeo, *Materials Science and Engineering A*, 478 (2008) 181.
- [13] F. Iacoviello, O. Di Bartolomeo, V. Di Cocco, V. Piacente, In: *17th European Conference on Fracture (ECF 17)*, Brno CZ, (2008) 52.
- [14] F. Iacoviello, V. Di Cocco, V. Piacente, In: *Convegno IGFX, Torino, (2009)*.
- [15] F. Iacoviello, V. Di Cocco, In: *International Conference on Crack Paths (CP2009)*, Vicenza, 2009.
- [16] V. Di Cocco, F. Iacoviello, M. Cavallini, *Engineering Fracture Mechanics*, 77 (2010) 2016.
- [17] V. Di Cocco, F. Iacoviello, D. Iacoviello, In: *XXI Convegno Nazionale del Gruppo Italiano Frattura (IGF)*, Cassino (FR), (2011).
- [18] <http://tu-freiberg.de/fakult4/imfd/fkm/projekte/zybell-dfg-ermuedung-ggg/index.en.html>