

Micromeccanismi di danneggiamento in una ghisa sferoidale perlitica sollecitata a trazione

V. Di Cocco, F. Iacoviello, M. Cavallini

L'analisi dei micromeccanismi di danneggiamento nelle ghise sferoidali è prevalentemente focalizzata sulle ghise sferoidali a matrice ferritica. In letteratura l'attenzione si è solitamente concentrata sulla nucleazione di vuoti in corrispondenza degli sferoidi di grafite e sulla crescita di questi vuoti fino alla rottura catastrofica.

Recentemente è stato verificato sperimentalmente che il ruolo svolto dagli sferoidi di grafite nelle ghise sferoidali a matrice ferritica è più complesso e che non può essere confinato al solo "debonding" dello sferoide dalla matrice ferritica. In questo lavoro vengono analizzati i micromeccanismi di danneggiamento a trazione in una ghisa sferoidale con matrice completamente perlitica mediante prove di trazione effettuate su microprovinci ed osservazione al microscopio elettronico a scansione (SEM) della superficie laterale durante lo svolgimento della prova meccanica (prove "in situ"). Durante lo svolgimento della prova si è focalizzata l'attenzione sia sul ruolo svolto dagli sferoidi di grafite che sull'evoluzione del danneggiamento della matrice perlitica.

Parole chiave:

Ghisa; Frattura; Prove meccaniche

INTRODUZIONE

Le ghise sferoidali costituiscono una valida alternativa all'impiego delle ghise malleabili e di altre leghe ferrose grazie alle loro notevoli proprietà meccaniche ed al loro costo ridotto: la presenza di elementi di grafite non più sotto forma lamellare, ma sferoidale, permette di ottenere un deciso miglioramento delle proprietà meccaniche, conservando le migliori caratteristiche delle ghise, fra cui, anzitutto, la colabilità. Tale risultato è ottenuto mediante un attento controllo della composizione chimica, con un'importante diminuzione dei costi di produzione rispetto

alle più tradizionali ghise malleabili. Negli ultimi decenni, al fine di ottenere differenti combinazioni delle proprietà meccaniche, sono stati ottimizzati differenti trattamenti termici e differenti composizioni chimiche, modificando in tal modo la microstruttura della matrice: è stato possibile ottenere differenti combinazioni delle proprietà meccaniche controllando la microstruttura, ottenendo ghise sferoidali ferritiche, ferrito-perlitiche, perlitiche, bainitiche, austenitiche ed "austemprate" [1, 2]. 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. (Fig. 1).

L'analisi dei micromeccanismi di danneggiamento nelle ghise sferoidali si è principalmente focalizzato sul distacco matrice - elementi di grafite (debonding) e sulla conseguente crescita dei microvuoti conseguenti, con una rottura che si verifica principalmente per coalescenza di detti microvuoti [3-9]. La sequenza proposta per le ghise sferoidali ferritiche [5] è la seguente:

- Distacco dei noduli di grafite dalla matrice ferritica già per va-

Vittorio Di Cocco, Francesco Iacoviello

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

Mauro Cavallini

Università di Roma "La Sapienza", Dip. ICMA via Eudossiana 18, 00184 Roma

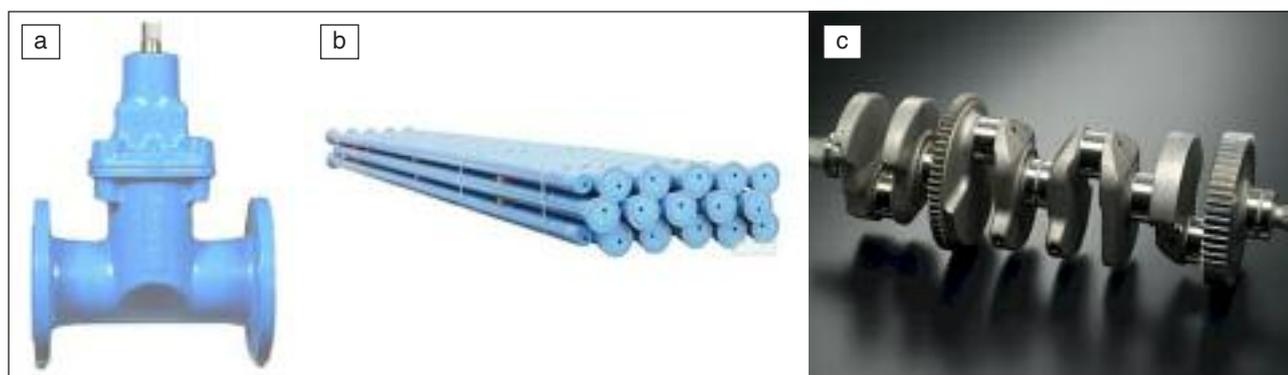


FIG. 1 Alcuni manufatti in ghisa sferoidale. a) valvola, b) tubi, c) albero a gomito.

Ductile cast iron applications. a) valves, b) tubes, c) crankshaft.

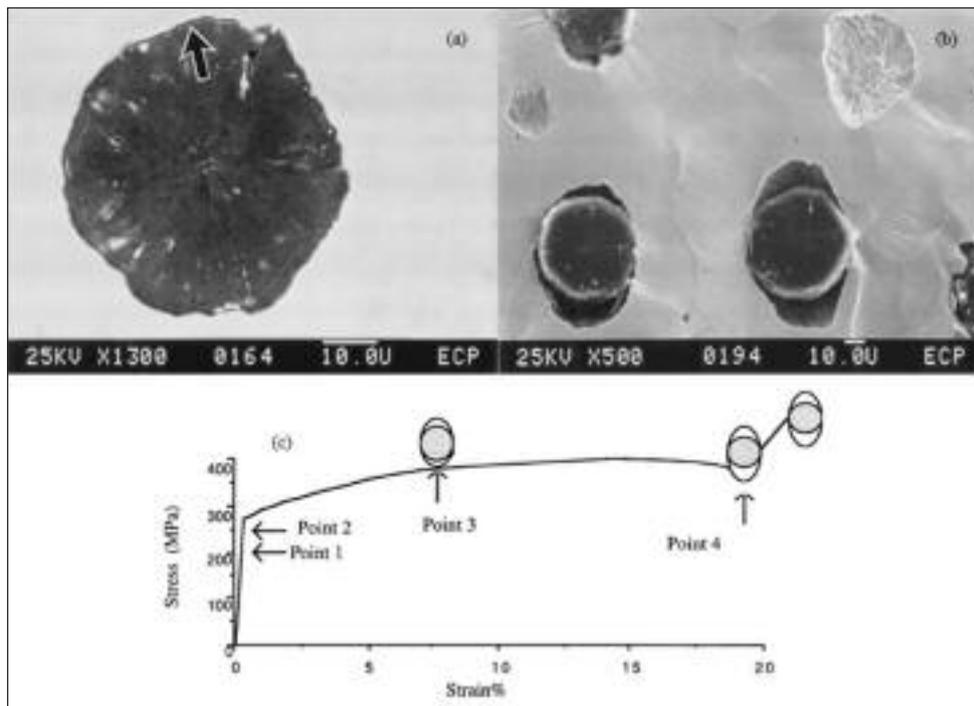


FIG. 2
Evoluzione del danneggiamento in una ghisa sferoidale ferritica durante una prova di trazione [5]:
a) distacco dell'interfaccia (punto 2);
b) crescita della cavità intorno ai noduli (punto 3);
c) Curva stress-strain.
Matrix-graphite nodules debonding evolution during tensile test [5]:
a) debonding corresponding to nodule-matrix interface (point 2)
b) void growth around nodules (point 3)
c) stress-strain curve.

lori non elevati della sollecitazione unitaria;

- Deformazione plastica della matrice in prossimità dei noduli di grafite.
- Innesco di microcricche nella matrice ferritica.
- Collegamento degli elementi di grafite mediante le microcricche, formando cricche di dimensioni maggiori.
- Formazione di macrocricche.

Numerosi studi sono stati quindi dedicati alla descrizione della crescita di singoli vuoti mediante relazioni analitiche ed alla analisi dell'influenza della geometria del vuoto e del comportamento della matrice, ottenendo numerose leggi costitutive, fra le quali il modello di Gurson modificato da Tvergaard-Needleman (modello GNT) è spesso preferito. In tali modelli, il ruolo svolto dagli elementi di grafite viene considerato come trascurabile e la ghisa sferoidale viene assimilata, dal punto di vista del comportamento meccanico, alla stregua di un solido poroso con matrice duttile (nel caso della matrice ferritica). Gli autori del presente lavoro hanno approfondito i meccanismi di danneggiamento nelle ghise sferoidali [9-13], evidenziando come il meccanismo di distacco degli sferoidi, seguito dalla crescita dei microvuoti sia, nel caso delle ghise sferoidali a matrice ferritica, assolutamente riduttivo

dell'effettivo ruolo svolto dagli sferoidi e sottolineando che gli effettivi micromeccanismi di danneggiamento siano decisamente più complessi. Questi possono essere riassunti come segue:

- il distacco matrice ferritica - nodulo di grafite viene osservato solo saltuariamente;
- il principale micromeccanismo di danneggiamento osservato consiste nella nucleazione e propagazione di microcricche all'interno degli sferoidi di grafite, in corrispondenza dell'interfaccia fra il guscio di grafite ottenuto a seguito della diminuzione di solubilità del carbonio nell'austenite ed il "cuore" dello sferoide (meccanismo "a cipolla"), Fig. 3;
- viene talvolta osservato un secondo meccanismo di tipo disgregativo, dove si evidenzia la nucleazione di una microcricca al centro dello sferoide e la sua propagazione con l'aumentare della sollecitazione.
- la matrice metallica è interessata dal processo di danneggiamento mediante la formazione di bande di scorrimento per valori più bassi della sollecitazione, mentre, per valori più elevati si verifica l'innesco e la propagazione di microcricche: la rottura finale si ottiene grazie al collegamento fra le microcricche ed alla conseguente formazione di macrocricche.

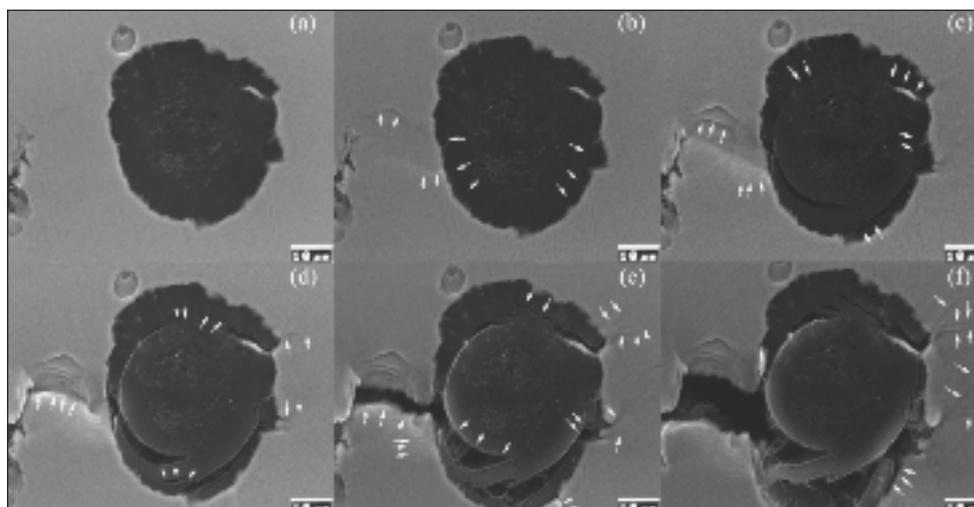


FIG. 3
Meccanismi di danneggiamento in una ghisa sferoidale ferritica EN GJS350-22 per i seguenti valori di σ [MPa]- ϵ %: (a) 320-2%, (b) 360-3%, (c) 400-5%, (d) 430-7%, (e) 450-10%, (f) 470-14% [13].
Damaging micromechanisms in a ferritic ductile cast iron EN GJS350-22 corresponding to the following σ [MPa]- ϵ % values: (a) 320-2%, (b) 360-3%, (c) 400-5%, (d) 430-7%, (e) 450-10%, (f) 470-14% [13].

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

TAB. 1 *Composizione chimica della ghisa perlitica EN GJS700-2 (5% ferrite - 95% perlite).*

EN GJS700-2 ductile cast iron chemical composition (5% ferrite - 95% pearlite).

In questo lavoro viene considerata una ghisa sferoidale con matrice perlitica. I meccanismi di danneggiamento vengono analizzati considerando provini sottoposti ad una sollecitazione di trazione ed osservando al microscopio elettronico a scansione la superficie laterale del provino durante lo svolgimento della prova.

MATERIALE E MEDOLOGIE DI PROVA

La ghisa sferoidale investigata è caratterizzata da una matrice quasi completamente perlitica e da una elevata nodularità degli elementi di grafite. La sua composizione chimica è riportata in Tab. 1.

Sono stati ricavati tre microprovini di trazione a sezione rettangolare, con il tratto utile caratterizzato dalle seguenti misure: 25 x 2 x 1 mm.

I provini, preparati metallograficamente (Nital 2), sono inseriti in un afferraggio rimovibile (Fig. 4a) e sottoposti ad una prova di trazione in controllo di posizione, con interruzione della deformazione in corrispondenza di determinati valori della deformazione medesima, asportazione dalla macchina dell'afferraggio rimovibile (contenente il provino sollecitato, Fig. 4b) ed inserimento dell'afferraggio nella camera a vuoto del microscopio elettronico a scansione (SEM). Sono stati scelti almeno 25 punti nella zona centrale della superficie laterale di ciascun provino investigato e, durante l'avanzamento della prova di trazione, in corrispondenza di ogni interruzione, è stato osservato il danneggiamento in corrispondenza dei punti scelti. Durante la

prova di trazione, la deformazione del provino e la sollecitazione applicata sono state rispettivamente misurate con un Linear Variable Differential Transformer (LVDT) e due celle di carico miniaturizzate (10 kN ognuna).

Al termine della prova di trazione, la superficie di frattura è stata analizzata al SEM.

RISULTATI E COMMENTI

L'osservazione della superficie laterale dei provini in ghisa sferoidale perlitica permette di evidenziare come i meccanismi di danneggiamento siano decisamente diversi da quelli osservati nella ghisa sferoidale a matrice ferritica. Come considerazione di tipo generale, è importante evidenziare come il danneggiamento ha inizio all'interno degli sferoidi di grafite, già nella fase macroscopicamente "elastica". Inoltre il distacco "puro" fra matrice e noduli di grafite (debonding) è sicuramente molto più frequente rispetto alla ghisa completamente ferritica (Fig. 5, la direzione di applicazione della sollecitazione, indicata dalle frecce a sinistra in alto, è la medesima per tutte le foto riportate). Si può infatti osservare come i primi segni di un distacco matrice - sferoidi siano già presenti nella Fig. 5b (frecce bianche), e come tale distacco divenga sempre più evidente con l'incremento del carico, senza evidenziare né l'innesco di cricche nella zona centrale degli sferoidi osservati, né la formazione di bande di scorrimento all'interno della matrice metallica.

Nello sferoide più piccolo si innesca e propaga una cricca che ricorda in parte il meccanismo "a cipolla" descritto nella ghisa

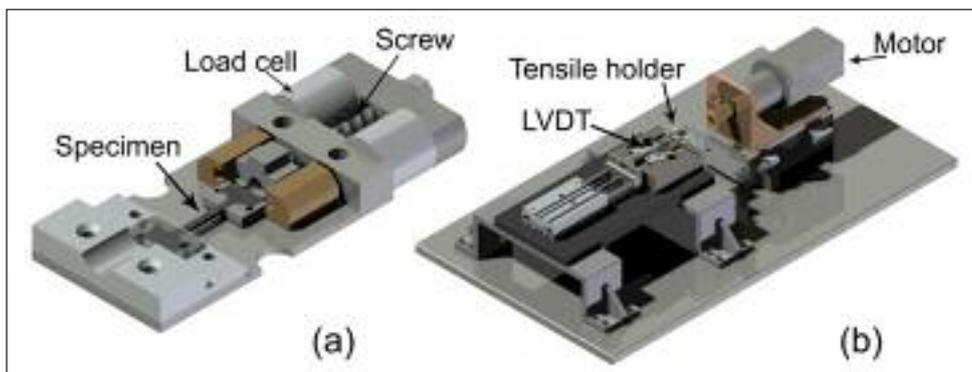


FIG. 4 *Macchina di trazione con afferraggio rimovibile per prove di trazione con osservazione SEM [14].*

SEM "in situ" testing machine: tensile holder with microtensile specimen (a) and tensile test machine (b) [14].

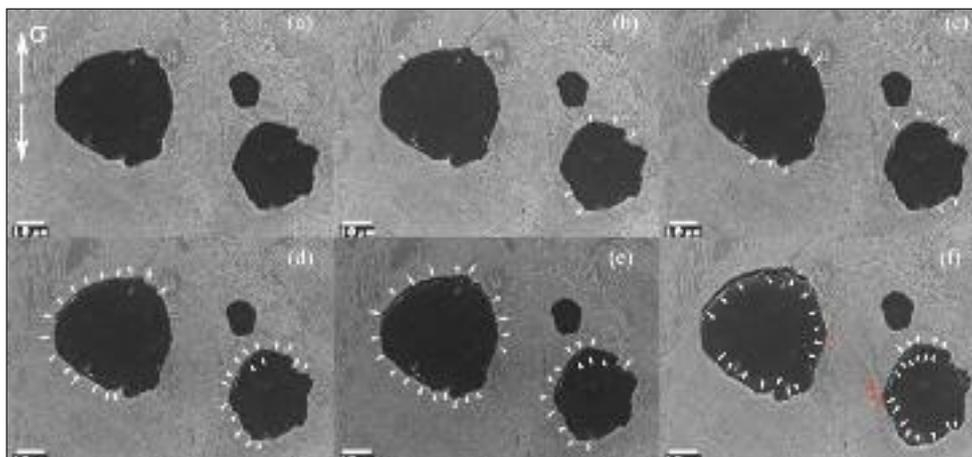


FIG. 5 *Evoluzione del danneggiamento nella ghisa sferoidale perlitica per i seguenti valori σ [MPa]- ϵ %: a) 0 - 0; b) 380 - 0.28; c) 660 - 0.45; d) 790 - 0.67; e) 840 - 0.94; f) 850 - 1.13.*

Damaging evolution in a pearlitic ductile cast iron corresponding to the following σ [MPa]- ϵ % values: a) 0 - 0; b) 380 - 0.28; c) 660 - 0.45; d) 790 - 0.67; e) 840 - 0.94; f) 850 - 1.13.

sferoidale ferritica, ma è evidente che l'importanza di tale meccanismo risulta decisamente ridotta, sia considerando l'effetto sugli sferoidi, che conservano sostanzialmente la loro forma, sia considerando la propagazione di tale cricca, che resta decisamente limitata. Solo in corrispondenza di sollecitazioni molto elevate, prossime alla rottura del provino, si evidenzia la formazione di microcricche che si innescano all'interfaccia matrice sferoide (Fig. 5f, frecce rosse).

La morfologia "a cipolla" può essere meglio osservata nella Fig. 6: tale meccanismo, comunque meno frequente rispetto alle ghise ferritiche, risulta essere meno sviluppato, con minori "esfoliazioni" e con una minore deformazione complessiva dello sferoide: questo, infatti, risulta conservare la propria forma, nonostante l'evoluzione del danneggiamento. Nella Fig. 6f è possibile osservare l'evoluzione del danneggiamento nella matrice (frecce rosse), con microcricche che si innescano in corrispondenza dell'interfaccia sferoide grafite e propagano all'interno della matrice.

Nel caso della ghisa sferoidale con matrice perlitica, si può talvolta osservare la nucleazione di una o più microcricche al centro dello sferoide, con una loro propagazione (ed incremento del loro numero) con l'aumentare della sollecitazione (Fig. 7). Anche in questo caso il danneggiamento inizia nel campo elastico della curva $\sigma - \epsilon$, con un distacco (debonding) dello sferoide dalla matrice (Fig. 7b). L'incremento della sollecitazione comporta quindi l'innescio delle prime cricche nella zona centrale dello sferoide, con il distacco matrice-sferoide che diviene sempre più evidente (Fig. 7c, d, e). In prossimità della rottura di schianto (Fig. 7f), lo sferoide risulta quasi completamente distaccato dalla matrice metallica, con diverse cricche presenti all'interno dello sferoide stesso. In particolare, la cricca presente al centro dello sferoide

risulta propagata per circa un terzo del diametro dello sferoide. L'analisi della superficie di frattura conferma i meccanismi precedentemente descritti. È decisamente frequente la presenza di sferoidi sostanzialmente integri affioranti sulla superficie di frattura con un evidente distacco dalla matrice perlitica (Fig. 8). Cricche secondarie partono dallo sferoide all'interno di una matrice caratterizzata da una morfologia di frattura decisamente fragile. Nel caso in cui lo sferoide subisce un completo distacco dalla superficie di frattura, non si hanno evidenti residui di grafite all'interno della cavità (Fig. 9).

Da un punto di vista generale, per tutte le morfologie descritte, il danneggiamento della matrice risulta comunque sempre piuttosto modesto, con una deformazione plastica decisamente ridotta. Si può, ad esempio, notare come la piccola zona ferritica presente nella Fig. 6 al di sotto dello sferoide di dimensioni inferiori (a sinistra, in basso), non cambi la propria geometria durante l'evoluzione della prova di trazione. Si possono innescare alcune cricche molto corte in prossimità dell'interfaccia matrice - sferoide, ma, per valori della sollecitazione prossimi alla rottura di schianto, il danneggiamento risulta localizzato negli sferoidi ed in loro prossimità, senza che si formino cricche all'interno della matrice, come invece osservato nella ghisa sferoidale ferritica.

Dal confronto fra la ghisa ferritica analizzata dagli autori in precedenti lavori [10-13] e la ghisa perlitica investigata in questo lavoro, si può osservare come i meccanismi di danneggiamento all'interno degli sferoidi di grafite siano sempre gli stessi (distacco matrice-sferoide, meccanismo "a cipolla", formazione di cricca o cricche al centro dello sferoide) e che la matrice intervenga sull'importanza relativa dei differenti meccanismi e sulla loro evoluzione. In particolare, si può osservare come il debonding

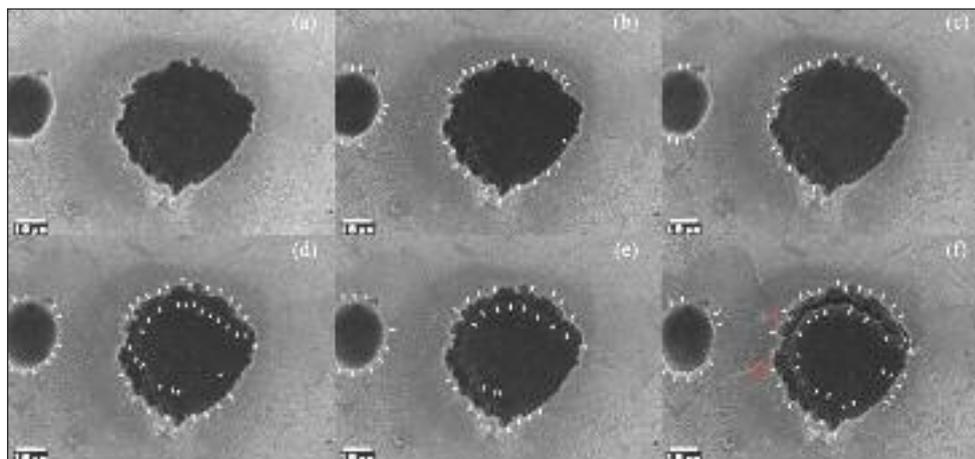


FIG. 6
Evoluzione del danneggiamento nella ghisa sferoidale perlitica per i seguenti valori σ [MPa]- ϵ %:
a) 0 - 0; b) 380 - 0.28; c) 660 - 0.45; d) 790 - 0.67; e) 840 - 0.94; f) 850 - 1.13.

Damaging evolution in a pearlitic ductile cast iron corresponding to the following σ [MPa]- ϵ % values: a) 0 - 0; b) 380 - 0.28; c) 660 - 0.45; d) 790 - 0.67; e) 840 - 0.94; f) 850 - 1.13.

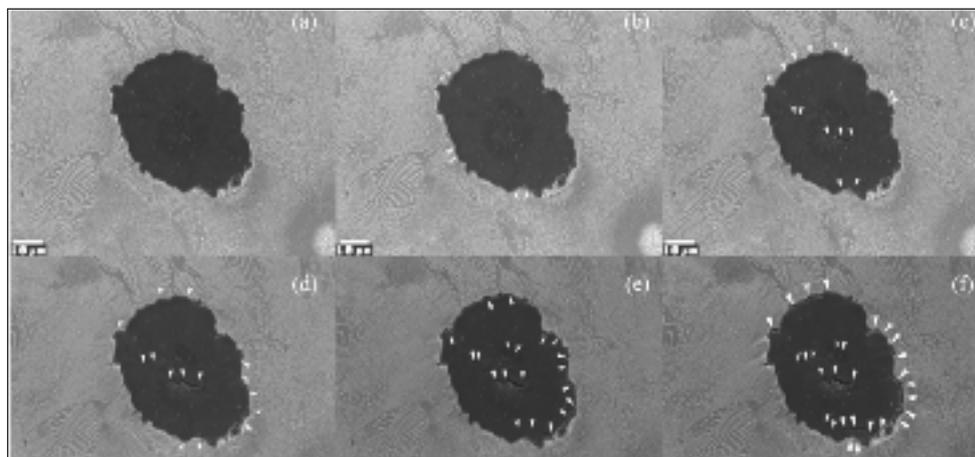


FIG. 7
Evoluzione del danneggiamento nella ghisa sferoidale perlitica per i seguenti valori σ [MPa]- ϵ %:
a) 0 - 0; b) 380 - 0.28; c) 660 - 0.45; d) 790 - 0.67; e) 840 - 0.94; f) 850 - 1.13.

Damaging evolution in a pearlitic ductile cast iron corresponding to the following σ [MPa]- ϵ % values: a) 0 - 0; b) 380 - 0.28; c) 660 - 0.45; d) 790 - 0.67; e) 840 - 0.94; f) 850 - 1.13.

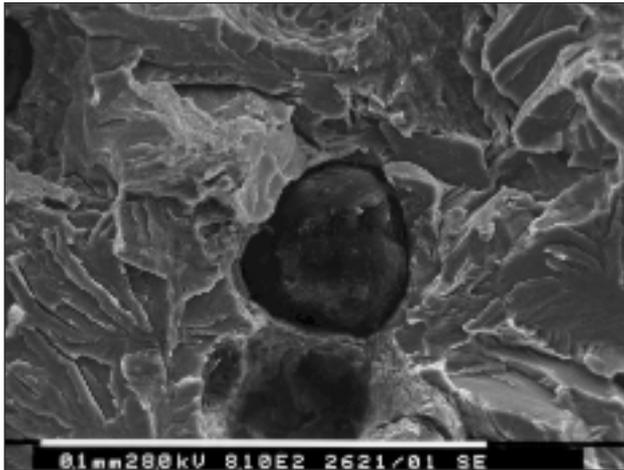


FIG. 8 Ghisa sferoidale perlitica: superficie di frattura.
Pearlitic ductile cast iron: fracture surface.

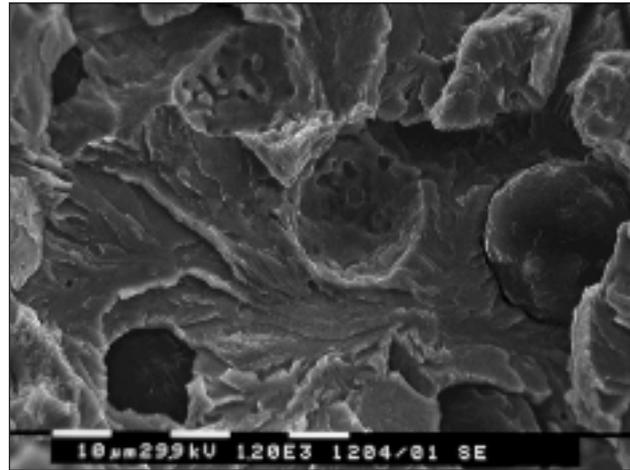


FIG. 9 Ghisa sferoidale perlitica: superficie di frattura.
Pearlitic ductile cast iron: fracture surface.

“puro” fra matrice e sferoidi sia praticamente sempre presente nella ghisa perlitica e quasi completamente assente in quella ferritica. Inoltre è importante sottolineare come, contrariamente alla matrice ferritica, nel caso della ghisa a matrice perlitica si abbia una ridotta evidenza di danneggiamento all’interno della matrice (tutt’al più, microcricche di ridotta estensione che innescano in corrispondenza dell’interfaccia matrice-sferoide).

CONCLUSIONI

In questo lavoro sono stati analizzati i micromeccanismi di danneggiamento di una ghisa sferoidale con matrice perlitica sollecitata a trazione, mediante l’utilizzo di microprovini e di una attrezzatura in grado di consentire l’osservazione SEM della superficie laterale dei microprovini sotto carico.

Dai risultati sperimentali ottenuti, è evidente il ruolo svolto dagli sferoidi di grafite. In tutti gli sferoidi investigati, si è evidenziata la presenza di un danneggiamento irreversibile all’interno della ghisa già nel campo elastico della curva σ - ϵ , sempre sotto forma di un distacco netto dello sferoide dalla matrice metallica, ovvero senza la presenza di residui di grafite sulla matrice metallica (debonding).

Oltre al meccanismo di debonding, sono stati evidenziati altri micromeccanismi di danneggiamento:

- Il meccanismo “a cipolla” in cui si ha il parziale distacco di un guscio di grafite da un nucleo più compatto;
- La formazione di una o più microcricche al centro dello sferoide, con parziale disgregazione del medesimo.

Il confronto fra questi meccanismi e quelli evidenziati nella ghisa a matrice ferritica evidenzia come la matrice intervenga sulla frequenza con cui i micromeccanismi si verificano e sulla loro evoluzione, e non piuttosto sulla loro tipologia. Infatti:

- il “puro” debonding è nella ghisa ferritica praticamente assente, o comunque piuttosto raro, mentre nella ghisa perlitica risulta avere una importanza notevole;

- il meccanismo “a cipolla” risulta essere nella ghisa perlitica decisamente meno sviluppato rispetto alla ghisa con matrice ferritica;
- l’innescò e la propagazione di cricche al centro dello sferoide risulta anch’esso meno importante nella ghisa perlitica rispetto alla ghisa ferritica: in quest’ultima, infatti è possibile arrivare ad una vera e propria disgregazione dello sferoide, confermata anche dalle analisi delle superfici di frattura.

BIBLIOGRAFIA

- [1] R.G. Ward, An Introduction to the Physical Chemistry of Iron and Steel Making, Arnold, London (1962).
- [2] C. Labrecque, M. Gagne, Can. Metall. Quart., 37 (1998) 343.
- [3] R. C. Voigt, L. M. Eldoky, H. S. Chiou, AFS Trans., 94 (1986) 645.
- [4] L. Eldoky, R.C. Voigt, AFS Trans., 86-104 (1986) 631.
- [5] M.J. Dong, C. Prioul, D. François, Metall. And Mater. Trans., A 28A (1997) 2245.
- [6] K. S. Zhang, J.B. Bai, D. François, Int. J. of Solids and Structures, 36 (1999) 3407.
- [7] C. Guillermer-Neel, X. Feaugas, M. Clavel, Metall. And Mater. Trans., A 31A (2000) 3063.
- [8] C. Berdin, M.J. Dong, C. Prioul, Engineering Fracture Mechanics, 68 (2001) 1107.
- [9] J. H. Liu, X.Y. Hao, G.L. Li, G.Sh.Liu, Mater. Letters, 56 (2002) 748.
- [10] F. Iacoviello, V. Di Cocco, V. Piacente, O. Di Bartolomeo, Materials Science and Engineering, A 478 (2008) 181.
- [11] F. Iacoviello, O. Di Bartolomeo, V. Di Cocco, V. Piacente, In: 17th European Conference on Fracture (ECF 17), Brno (CZ), (2008) n.52.
- [12] F. Iacoviello, V. Di Cocco, In: International Conference on Crack Paths (CP2009), Vicenza (2009).
- [13] V. Di Cocco, F. Iacoviello, M. Cavallini, Engineering Fracture Mechanics, 77 (2010) 2016.
- [14] F. Iacoviello, V. Di Cocco, V. Piacente, Macchina automatica per morsetta estraibile per prove di trazione su mini provini: morsetta posizionabile all’interno della camera di un microscopio elettronico a scansione SEM, brevetto depositato il 7 novembre 2006, n. FR2006A00026

Abstract

Damaging micromechanisms analysis in a pearlitic ductile cast iron under a tensile stress state

Keywords: Ductile iron; Fracture; Mechanical tests

Damaging micromechanisms analysis in ferritic ductile cast irons is usually focused on the matrix behaviour and the main damaging micromechanism is often identified with voids nucleation corresponding to nodules pole caps: the volume of voids increases with the increasing of the stress up to the final rupture. Microcracks in graphite nodules are also observed, but their presence is not considered important. Damage main micromechanism is identified with graphite - matrix debonding, and all the other mechanisms are considered as negligible. As a consequence, ductile cast iron damage evolution could be summarized considering the following steps (Fig. 2):

- Separation between nodular graphite and matrix under low stress.
- Plastic deformation in matrix around nodular graphite.
- Initiation of microcracks in deformed matrix between nodular graphite.
- Linkage of graphite elements by microcracks and formation of larger microcracks.
- Linkage of main crack and selected microcracks to form macrocracks.

On the basis of this proposed micromechanism, numerous researchers provide analytical laws to describe growth of a single void, depending on the void geometries and matrix behaviour. In these models, ferritic ductile cast irons are essentially considered as porous materials, graphite nodules being considered as voids in an elastic-plastic matrix. Recently, it has been experimentally verified that the role played by graphite nodules in ferritic ductile cast iron is more complex and that graphite nodules - ferritic matrix debonding is only one of the observed damaging micromechanisms (Fig. 3). The main ferritic DCI damaging micromechanism consists in cracks nucleation and propagation in the outer graphite shell, identified as the one generated at cooling in the temperature range of the reduced carbon solubility in γ phase ("onion-like" mechanism). A second damaging micromechanism is sometimes observed together to the "onion-like" mechanism: cracks nucleate and propagate corresponding to the nodules core ("disgregation" mechanism). The importance of this damaging mechanism depends on the strain rate value and is probably influenced by the graphite nodule nucleation mechanism during solidification. "Pure" ferritic matrix-graphite nodule debonding is only seldom observed. Focusing the ferritic matrix, slip lines emanate corresponding to the nodule equator (lower stress values) with a consequent nucleation and propagation of short cracks (higher stress values): final rupture is obtained due to the linkage of cracked graphite nodules by microcracks, with the formation of larger macrocracks.

In this work, three microtensile specimens of a pearlitic ductile cast iron were investigated by means of step by step tensile tests. Specimen surfaces were observed in situ by means of a scanning electron microscope (SEM).

The investigated pearlitic ductile cast iron (Tab.1) was cut into microtensile specimens with a length x width x thickness equal to 25 x 2 x 1 mm, respectively. Specimens were ground, polished and step by step stressed with a tensile holder. At least 25 graphite elements were observed in situ using a SEM. During tensile tests, specimen deformation and applied load were measured by means of a Linear Variable Differential Transformer (LVDT) and two miniature load cell (10 kN each), Fig. 4.

Observed main damaging micromechanisms could be summarized as follows:

- matrix-graphite nodules debonding is more frequent if compared to ferritic ductile cast iron and is evident also in the elastic stage (Fig.5, white arrows).
- "onion like" mechanism is also observed, but it is less evident and less frequent if compared to ferritic ductile cast iron (Fig. 6, white arrows)
- cracks nucleation and propagation corresponding to the nodules core is seldom observed (Fig. 7, white arrows).
- Corresponding to higher stress values, microcracks nucleate corresponding to the nodule matrix interface and propagate in pearlitic matrix (Fig. 5 and 6, red arrows).