

MECCANISMI DI DANNEGGIAMENTO NELLE GHISE SFEROIDALI FERRITO-PERLITICHE

F. Iacoviello^a, A. De Santis^b, D. Iacoviello^b, O. Di Bartolomeo^a

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

^b *Università di Roma "La Sapienza", D.I.S., via Eudossiana 18, 00184 Roma*

SOMMARIO

I meccanismi di danneggiamento nelle ghise sferoidali sono influenzati dalla matrice della microstruttura e dalla presenza degli elementi di grafite. In questo lavoro sono stati investigati i meccanismi di danneggiamento in quattro ghise sferoidali ferrito-perlitiche sottoposte a sollecitazione di trazione mediante analisi delle superfici laterali dei provini al microscopio elettronico a scansione effettuate durante lo svolgimento della prova medesima (prove di trazione in situ). L'analisi di immagine quantitativa dell'evoluzione del danneggiamento ha permesso di quantificare l'evoluzione del processo, evidenziando l'importanza della microstruttura e l'importanza del ruolo svolto dagli elementi di grafite. L'importanza del distacco degli elementi di grafite dalla matrice metallica (debonding), spesso indicato come il principale o l'unico meccanismo di danneggiamento che coinvolge gli elementi di grafite, è confermata solo parzialmente.

ABSTRACT

Ductile irons damaging micromechanisms are influenced by matrix microstructure and by graphite spheroids presence. In this work, damaging micromechanisms were investigated considering four ferritic-pearlitic ductile irons, by means of tensile tests and in situ scanning electron microscope specimens surface analysis. Quantitative image analysis allowed to quantify the damaging evolution, considering the microstructure importance and the key role played by the graphite elements. The importance of the damaging micromechanism based on the matrix - graphite elements debonding is only partially confirmed.

1. INTRODUZIONE

L'elevata colabilità (tipica delle ghise grigie) e la buona tenacità (caratteristica tipica degli acciai) sono le proprietà che caratterizzano le ghise sferoidali, grazie alla particolare forma sferoidale degli elementi di grafite ottenuta non mediante trattamento termico di ghise bianche, come nel caso delle ghise malleabili, ma attraverso un attento controllo della composizione chimica. Queste ghise trovano un numero sempre crescente di applicazioni, ad esempio in campo automobilistico, e sono caratterizzate da una notevole combinazione delle principali proprietà: elevata duttilità (anche superiore al 18%), elevati valori di resistenza a trazione (fino a 1600 MPa, nel caso delle ghise austemperate) ed una elevata resistenza all'usura. Considerato che la combinazione delle proprietà meccaniche dipende dalla microstruttura, questa è solitamente utilizzata per indicare la tipologia di ghisa sferoidale considerata [1, 2].

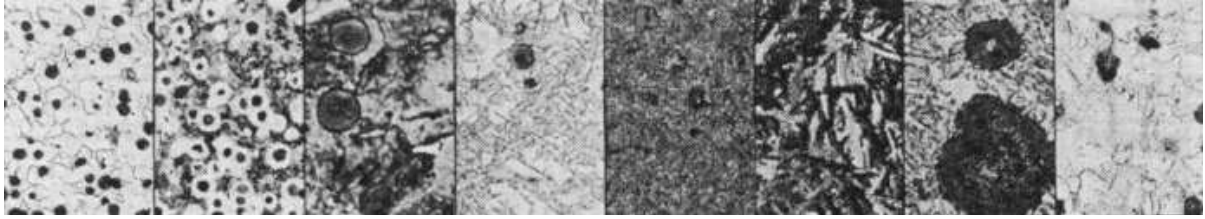


Fig. 1 - Ghise sferoidali con differenti matrici. Rispettivamente, da sinistra verso destra: ferritica; ferrito-perlitica; perlitica; martensitica; martensitica rinvenuta; austemperata ($R_m = 1050$ MPa); austemperata ($R_m = 1600$ MPa); austenitica [2].

L'ottimizzazione delle composizioni chimiche e dei trattamenti termici permette di ottenere un ampio ventaglio di disponibilità:

- ghise ferritiche, caratterizzate da una buona duttilità;
- ghise perlitiche, caratterizzate da una elevata resistenza a trazione
- ghise ferrito-perlitiche, con proprietà intermedie rispetto alle prime due famiglie dipendenti dalla frazione volumetrica e dalla distribuzione della ferrite e della perlite;
- ghise martensitiche, con una elevatissima resistenza, ma bassa tenacità e duttilità;
- ghise bainitiche, con una elevata durezza;
- ghise austenitiche, caratterizzate da una elevata resistenza alla corrosione in numerosi ambienti, elevata resistenza e stabilità dimensionale alle temperature elevate;
- ghise austemperate, che mostrano una elevatissima resistenza all'usura ed alle sollecitazioni a fatica.

Nel caso delle ghise sferoidali, il principale meccanismo di danneggiamento è spesso individuato nella crescita di vuoti in corrispondenza dei noduli di grafite: numerosi studi sono stati focalizzati nella descrizione della crescita di singoli vuoti mediante relazioni analitiche e nell'influenza della geometria del vuoto e del comportamento della matrice. Fra le numerose leggi costitutive proposte, il modello di Gurson modificato da Tvergaard-Needleman (modello GNT) [3-5] è spesso preferito. Gurson sviluppò la condizione classica di snervamento per un materiale poroso duttile e sviluppò l'idea che il processo fisico di danneggiamento in un materiale duttile poteva essere descritto dal comportamento di elementi caratterizzati da un volume considerato come rappresentativo. Tvergaard e Needleman proposero una modifica per descrivere la repentina diminuzione della resistenza per una crescita accelerata dei vuoti dovuti ad un meccanismo di coalescenza a partire da una frazione volumetrica dei vuoti considerata come critica (ed identificata empiricamente). Il modello GTN è divenuto nel tempo il criterio convenzionale per affrontare problemi di frattura duttile [6-9]. A partire da queste considerazioni, ne consegue che l'identificazione del distacco elementi di grafite – matrice e la crescita dei vuoti come principale meccanismo di danneggiamento nelle ghise sferoidali svolge un ruolo fondamentale nella applicabilità del modello GTN o di analoghi modelli costitutivi. L'applicazione di questi modelli richiede l'identificazione di alcuni parametri [3] che in taluni casi sono privi di un chiaro significato fisico [4]. Considerando delle ghise sferoidali completamente ferritiche, Berdin et al. [3] proposero che queste erano da considerarsi come un materiale poroso, con i noduli di grafite assimilabili a vuoti all'interno di una matrice elasto-plastica. Furono osservate delle microcricche all'interno dei noduli di grafite, ma la loro presenza non fu considerata come rilevante. Il distacco dei noduli di grafite dalla matrice (debonding) fu considerato come il solo meccanismo di danneggiamento realmente importante, mentre gli altri furono sistematicamente considerati come trascurabili.

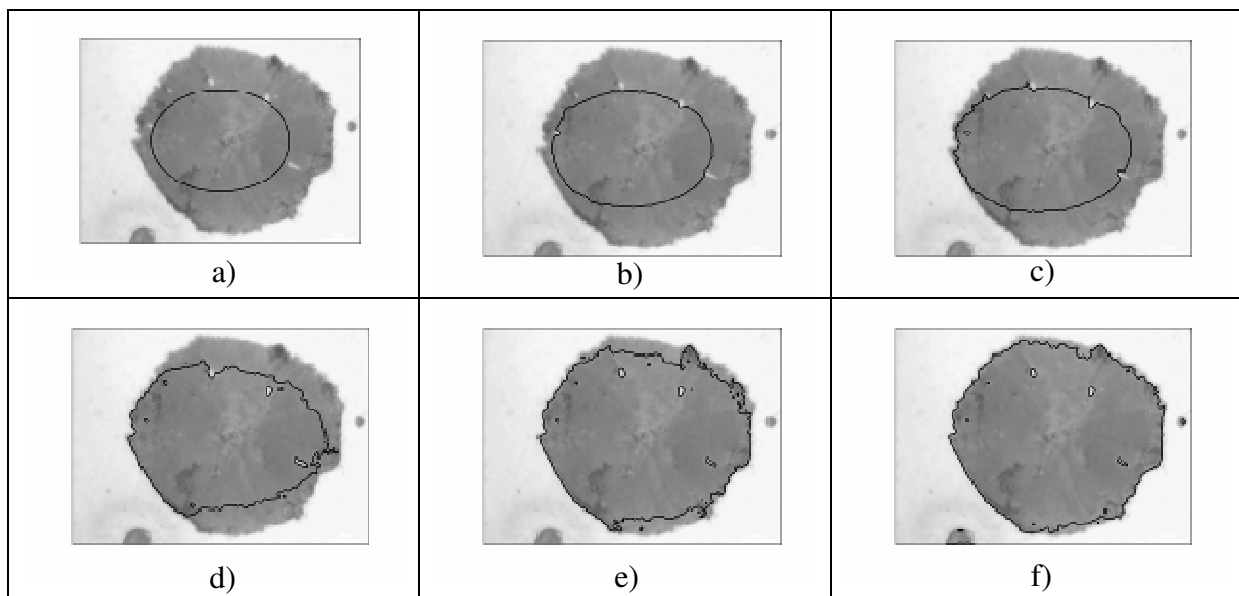
Al fine di analizzare il problema del danneggiamento duttile delle ghise sferoidali, l'approccio della meccanica del danneggiamento continuo (Continuum Damage Mechanics, CDM), spesso considerato come "macroscopico", può essere applicato in maniera alternativa all'approccio basato su modello di Gurson modificato, solitamente considerato come "microscopico" [10]. Originariamente introdotto da Kachanov [11] e da Rice e Tracey [12], e successivamente sviluppato (ad esempio da Lemaitre [13]), in questo approccio il danneggiamento viene valutato utilizzando la diminuzione del modulo di Young ($1-E'/E$), effettuando una serie di prove di trazione, con diminuzione del carico applicato in corrispondenza vari valori della deformazione, fino alla rottura del provino. L'approccio basato sulla CDM non necessita di una completa e corretta identificazione dei micromeccanismi di danneggiamento, ma necessita "solo" di descrivere la legge evolutiva del danno nel materiale investigato.

I micromeccanismi di danneggiamento nelle ghise sferoidali sono stati già investigati mediante prove di trazione “in situ” solo nel caso delle ghise sferoidali austemperate [14]. In questo caso sono stati identificati degli inneschi di cricca in corrispondenza delle interfacce elementi di grafite – matrice, con cricche propaganti all’interno degli stessi elementi di grafite: secondo gli autori, ne consegue che gli elementi di grafite non possono essere considerati come vuoti privi di resistenza e che la loro presenza non implica la presenza di “microintagli” e la conseguente intensificazione delle sollecitazioni. Anche nel caso di alcune ghise ferrito-perlitiche sono state effettuate prove meccaniche “in situ” [15-17], ed i risultati hanno permesso di identificare le seguenti fasi di innesco e propagazione:

- in corrispondenza di bassi valori della sollecitazione, il distacco fra elementi di grafite e matrice;
- deformazione plastica della matrice nell’introno del nodulo di grafite;
- innesco delle microcricche nella matrice deformata;
- collegamento degli elementi di grafite mediante microcricche;
- alcune microcricche che riescono a divenire “macro”.

Tutti questi micromeccanismi sono stati considerati come trascurabili [18], e solo la legge di crescita dei vuoti e la loro coalescenza nella ghisa sferoidale investigata (prevalentemente ferritica) è stata considerata per simulare il comportamento della ghisa mediante l’approccio di Gurson.

E’ evidente che il ruolo svolto dai noduli di grafite nelle fasi di innesco delle microcricche e nella loro propagazione merita un maggiore approfondimento. In questo lavoro, sono stati utilizzati dei microprovini di trazione ottenuti da quattro ghise sferoidali con differenti frazioni volumetriche di ferrite e di perlite e sono state eseguite delle prove di trazione interrotte a vari livelli di sollecitazione, in modo da poter investigare il livello di danneggiamento mediante una analisi delle superfici laterali al microscopio elettronico a scansione. Il problema dell’identificazione del danneggiamento, e della analisi quantitativa della sua evoluzione, è stato affrontato con un approccio variazionale denominato *segmentazione mediante contorni attivi* [19, 20]: una curva iniziale di forma qualunque viene fatta evolvere sul piano dell’immagine in modo tale da collocarsi sulle frontiere degli oggetti di interesse, che quindi possono essere separati gli uni dagli altri. Un esempio di applicazione è riportato nella Fig. 2: la curva iniziale divide l’immagine in due zone, la zona interna alla curva e quella ad essa esterna. La curva viene deformata in modo tale che all’interno di ciascuna delle due zone il livello di grigio sia il più possibile omogeneo, mentre risulti molto differente passando da una regione all’altra. In Fig. 2h) la configurazione finale definisce la segmentazione ottima che separa totalmente lo sferoide dallo sfondo; tale configurazione finale, e quindi la segmentazione ottimale (Fig. 2i)), non dipende dalla scelta iniziale della curva che evolve, e dipende esclusivamente dalla distribuzione del livello di grigio dell’immagine stessa. La procedura non richiede né aggiornamenti al variare delle immagini da elaborare né interventi da parte dell’esperto, per cui lo stesso algoritmo fornisce la segmentazione ottima per ogni immagine elaborata anche a fronte dei vari livelli di degradazione presenti. La convergenza dell’algoritmo è molto rapida, e può essere implementato su un personal computer di normali prestazioni (i dettagli sono riportati in Appendice).



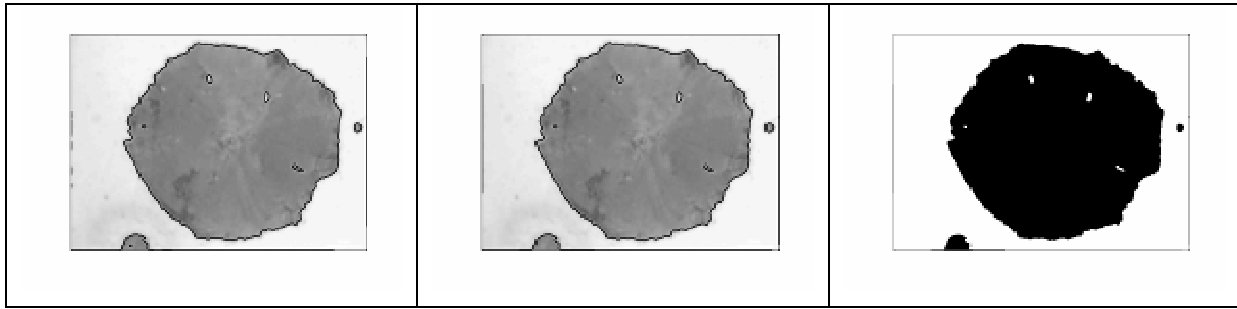


Fig.2. a)-h) - evoluzione del contorno attivo dalla configurazione arbitraria iniziale a quella finale;
i) binarizzazione.

2. MATERIALI E PROCEDURE SPERIMENTALI

Sono state considerate quattro differenti ghise sferoidali ferrito-perlitiche (le composizioni chimiche e le frazioni volumetriche delle fasi sono riportate nelle Tab. 1-4). Tutte le ghise sono caratterizzate da una elevata nodularità degli elementi di grafite (superiore all'85%) e da una analoga frazione volumetrica degli elementi di grafite (circa il 9-10%). Sono stati preparati dei microprovini di trazione a sezione rettangolare con il tratto utile caratterizzato dalle seguenti misure: 25 x 2 x 1 mm. I provini sono stati preparati metallograficamente, inseriti in un afferraggio removibile 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 removibile e del provino (sollecitato) ed inserimento nel microscopio elettronico a scansione (SEM). In corrispondenza di ogni interruzione, sono stati osservati almeno 20 elementi di grafite. Durante la prova di trazione, la deformazione del provino ed il carico applicato sono stati rispettivamente misurati con un Linear Variable Differential Transformer (LVDT) e due celle di carico miniaturizzate (10 kN ognuna). Le Fig. 3a e 3b mostrano rispettivamente l'afferraggio removibile e la macchina di trazione.

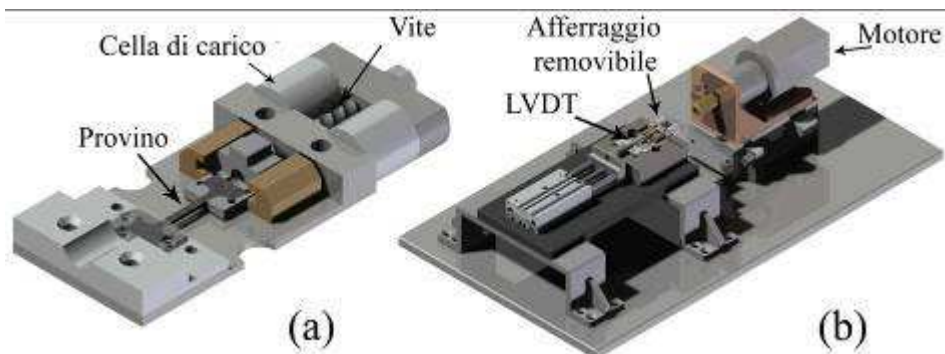


Fig. 3 - Afferraggio removibile con provino (a) e macchina di trazione (b)

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

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

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

C	Si	Mn	S	P	Cu	Cr	Mg	Sn
3,62	2,80	0,21	0,021	0,031	0,018	-	0050	0,021

Tabella 3. Composizione chimica (% peso) della ghisa sferoidale EN GJS500-7 (50% ferrite – 50% perlite).

C	Si	Mn	S	P	Cu	Cr	Mg	Sn
3,65	2,72	0,18	0,010	0,030	-	0,05	0,055	0,035

Tabella 4. Composizione chimica (% peso) della ghisa sferoidale EN GJS700-2 (5% ferrite – 95% perlite).

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

3. RISULTATI SPERIMENTALI E COMMENTI

La Fig. 4 mostra l'influenza della microstruttura sulla resistenza a trazione delle ghise sferoidali, mentre le Fig. 5-9 mostrano un esempio dell'influenza della microstruttura sui meccanismi di danneggiamento per tutte le microstrutture investigate (i punti nel diagramma σ - ϵ indicano le condizioni di carico, mentre le frecce indicano la direzione di applicazione del carico).

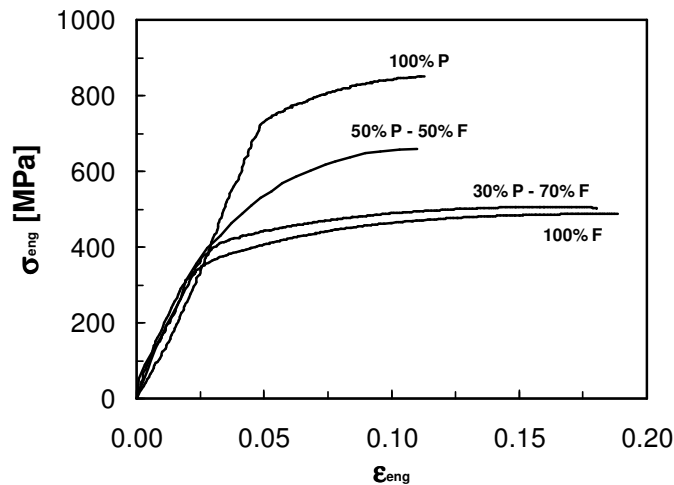


Fig. 4 - Influenza della microstruttura sulla resistenza a trazione delle ghise sferoidali.

La ghisa sferoidale completamente ferritica è caratterizzata in campo elastico dalla completa assenza di cricche e non presenta l'innesco evidente di microvuoti sia nella matrice che negli elementi di grafite (Fig. 5a e b). Durante la deformazione plastica, le cricche si innescano e propagano negli elementi di grafite con una morfologia "a cipolla" (Fig. 5c e d). Solo in corrispondenza di valori molto elevati della deformazione macroscopica, la deformazione plastica della matrice diviene evidente al SEM, con un contestuale sviluppo del danneggiamento degli elementi di grafite (Fig. 5e ed f). Il distacco degli elementi di grafite dalla matrice metallica in corrispondenza dell'interfaccia (spesso indicato con il termine di "debonding") non è stato osservato. Cricche all'interno degli elementi di grafite sono invece state osservate in alcuni casi.

La ghisa sferoidale 70% ferrite – 30% perlite è caratterizzata da una differente evoluzione del danneggiamento. La fase elastica continua a non presentare un danneggiamento evidente (né cricche né microvuoti, Fig. 6a e b). Durante la deformazione plastica, il danneggiamento si sviluppa sia nella matrice (preferenzialmente nella ferrite) con una deformazione plastica evidente, ed all'interfaccia matrice metallica – elementi di grafite, con un debonding che si innesca in corrispondenza dei "poli" dei noduli (Fig. 6c e d) e propaga con un conseguente distacco completo dei noduli (Fig. 6e ed f). Elevate deformazioni plastiche comportano anche l'innesco e la propagazione di cricche nella matrice. La presenza di cricche all'interno degli elementi di grafite è più evidente se confrontiamo il meccanismo con la ghisa completamente ferritica, ma resta comunque un evento abbastanza raro.

La ghisa sferoidale 50% ferrite – 50% perlite DCI è caratterizzata da una peculiare distribuzione delle fasi: la microstruttura, infatti, risulta essere costituita da "gusci" di ferrite intorno agli sferoidi di grafite, immersi all'interno di una matrice perlitica. Anche questa ghisa non presenta danneggiamenti rilevabili in campo elastico (cricche o microvuoti, Fig. 7a). Durante la deformazione plastica si osserva l'innesco di cricche all'interno degli elementi di grafite (Fig. 7b) e la deformazione plastica dei gusci ferritici. All'aumentare della deformazione plastica si osserva sia la propagazione delle cricche già nucleate, sia l'innesco di nuove cricche all'interno degli elementi di grafite (Fig. 7c, d, e ed f), con un incremento della deformazione plastica della matrice ed una conseguente propagazione delle cricche nei gusci ferritici. Il distacco degli elementi di grafite dalla matrice (debonding) non è stato osservato.

La ghisa sferoidale completamente perlitica è caratterizzata dall'assenza di un danneggiamento irreversibile solo per valori molto bassi della sollecitazione (Fig. 8a). Infatti, già in campo elastico si osserva l'innesco e la propagazione di cricche in corrispondenza dei "poli" degli sferoidi, con innesco e propagazione di cricche anche nella matrice metallica (Fig. 9a). L'incremento della deformazione implica sia la propagazione delle cricche nei noduli (Fig. 8c, d, e ed f), sia la deformazione plastica della matrice, con propagazione di cricche nella matrice perlitica (Fig. 9b e c). La presenza di cricche nel "cuore" degli sferoidi non è un evento raro (Fig. 9c), mentre è più difficile osservare il distacco degli sferoidi dalla matrice.

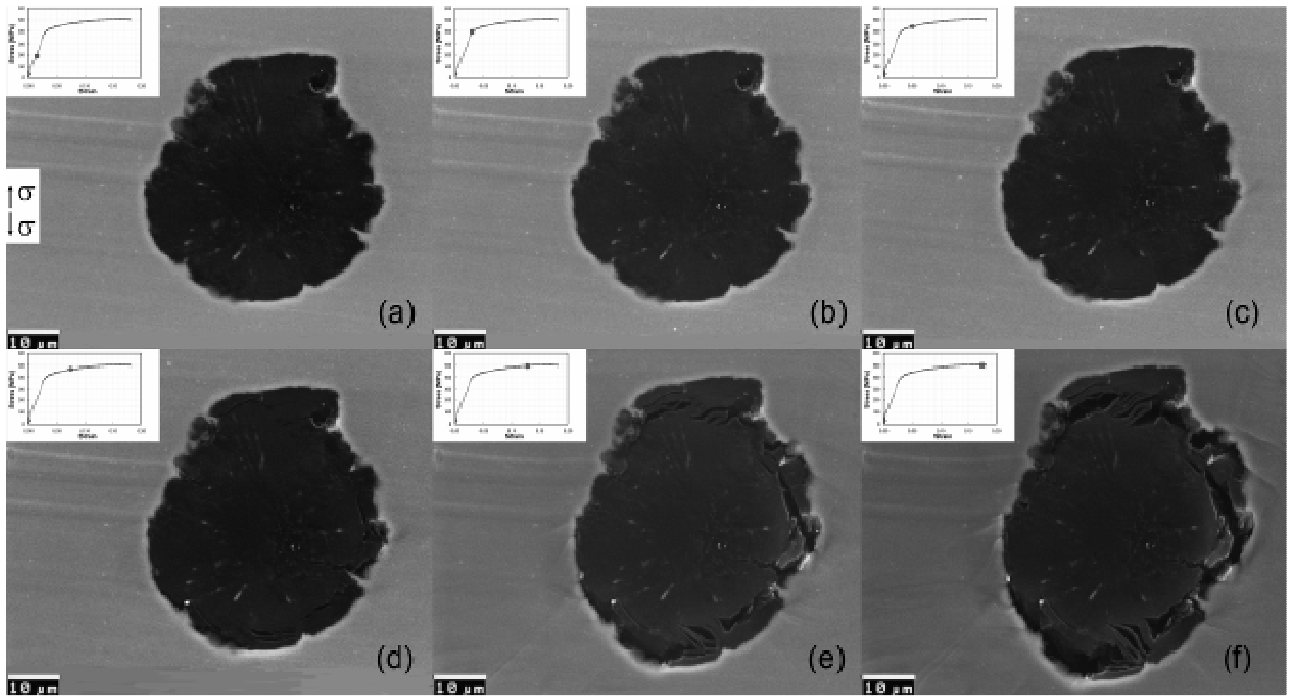


Fig. 5 - Ghisa sferoidale EN GJS350-22 (100% ferrite).
Analisi SEM "in-situ" della superficie laterale durante la prova di trazione.

La variazione della morfologia degli sferoidi conseguente all'incremento della deformazione è stata quantificata considerando la variazione di opportune grandezze a partire dalle immagini prese con il microscopio elettronico a scansione durante la prova di trazione medesima. Le grandezze considerate sono le seguenti:

- Solidità: è una misura di quanto il nodulo "è pieno" ovvero contiene buchi o insenature; è il rapporto tra l'area del nodulo e l'area del più piccolo poligono convesso che contiene il nodulo; più il valore ottenuto è vicino ad 1, e più si è in presenza di un nodulo ben formato, con contorni non frastagliati;
- Diametro dello sferoide nella direzione del carico normalizzato rispetto al valore corrispondente ad una sollecitazione nulla ($D_{\text{sferoide}}/D_{\text{sferoide iniziale}}$);
- Diametro dello sferoide ortogonalmente alla direzione del carico normalizzato rispetto al valore corrispondente ad una sollecitazione nulla;

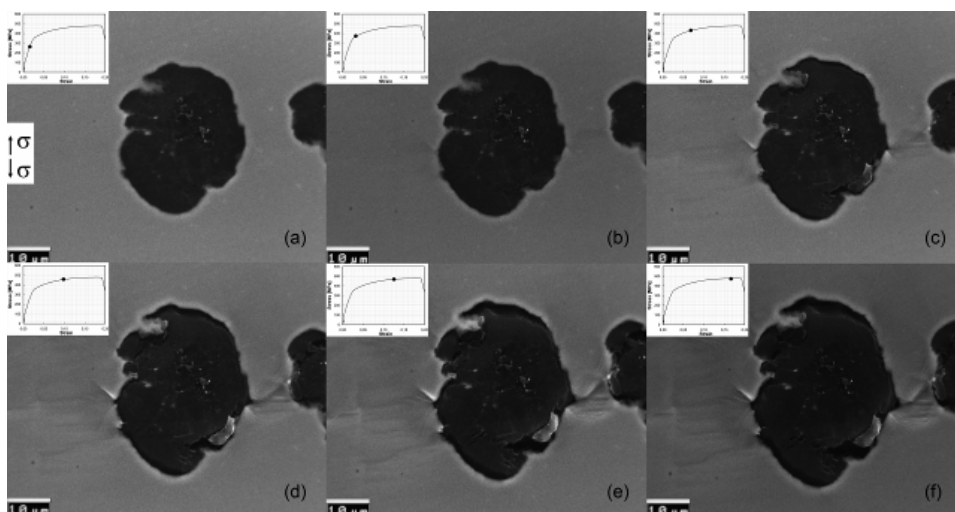


Fig. 6 - Ghisa sferoidale EN GJS450-10 (70% ferrite – 30% perlite).
Analisi SEM "in-situ" della superficie laterale durante la prova di trazione.

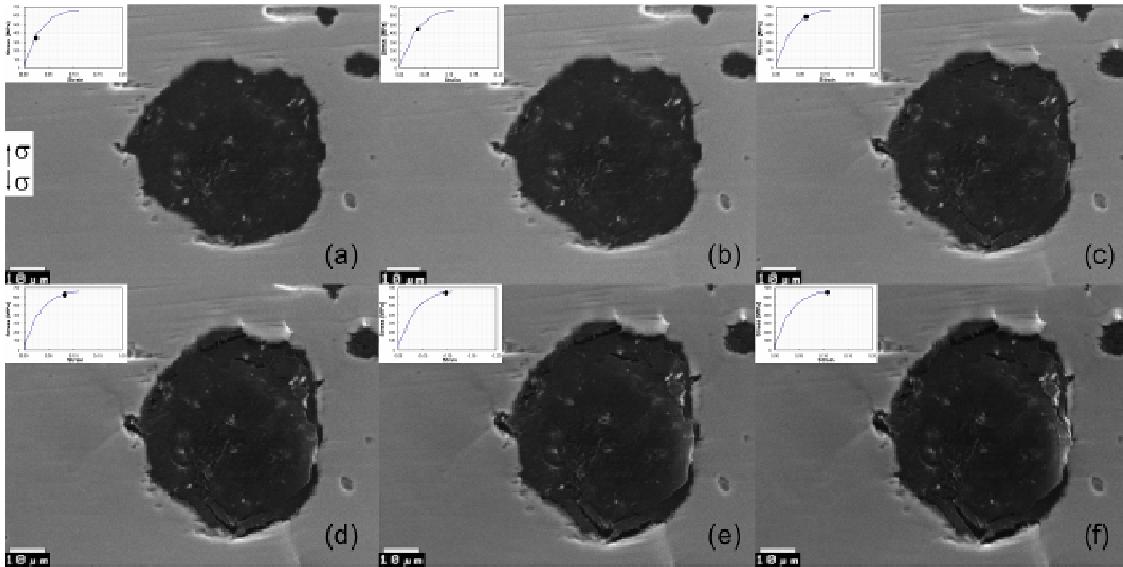


Fig. 7 - Ghisa sferoidale EN GJS500-7 (50% ferrite – 50% perlite).
Analisi SEM “in-situ” della superficie laterale durante la prova di trazione.

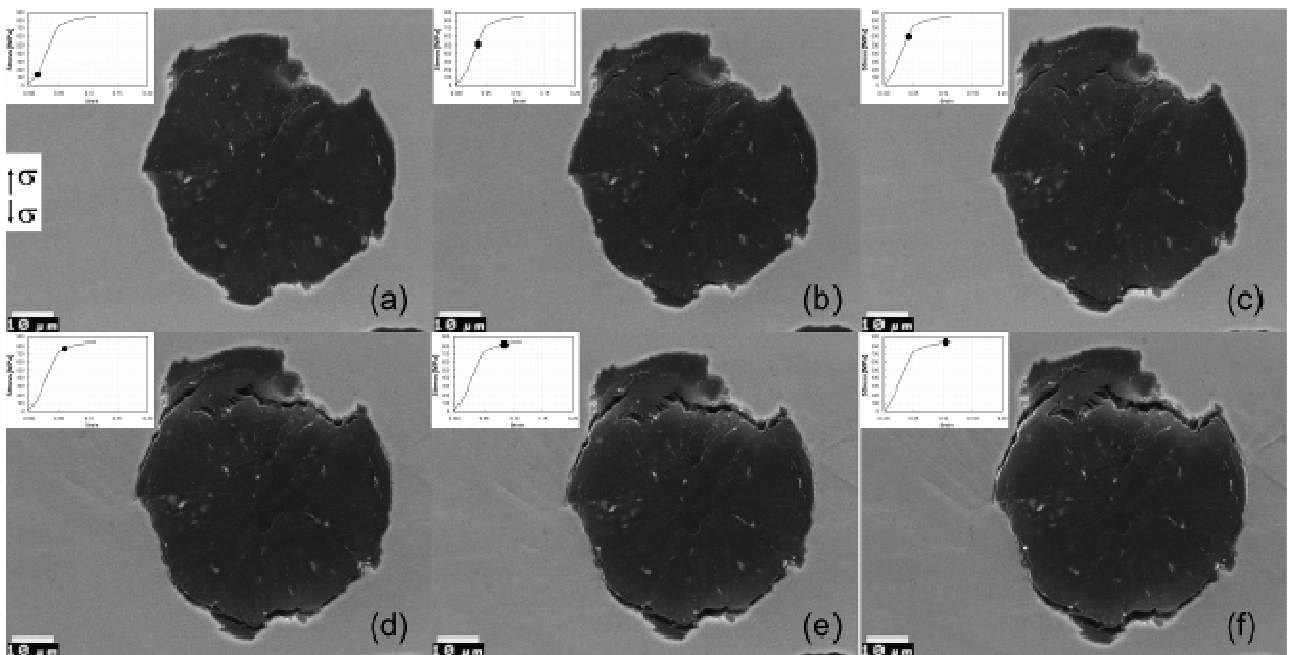


Fig. 8 - Ghisa sferoidale EN GJS700-2 (100% perlite).
Analisi SEM “in-situ” della superficie laterale durante la prova di trazione.

In questo lavoro si è ritenuto opportuno ricorrere ad una segmentazione a 4 livelli (Fig.10b), convenzionalmente scelti equispaziati tra 0 e 1, in cui il nodulo è certamente rappresentato dalle zone più scure. Quindi si è costruito una immagine a due livelli ponendo pari a 0 la regione del nodulo ottenuta dall'unione delle regioni con i due livelli più bassi, e ponendo pari a 1 il resto dell'immagine, Fig.10c); sull'immagine binaria così ottenuta il nodulo è un oggetto ben definito nel suo insieme (non solo come aggregato di pixel) ed è possibile misurarne le proprietà morfologiche di interesse. Questo procedimento è stato ripetuto per ogni immagine della sequenza relativa alle varie fasi della risposta del materiale alla variazione del carico applicato; in questo modo è stato possibile determinare dinamicamente l'evoluzione delle cricche di fatica valutando la variazione della morfologia del nodulo.

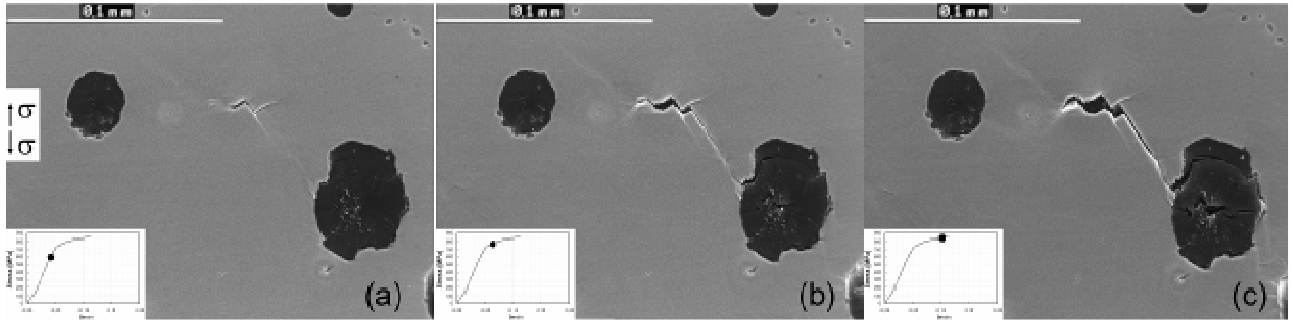


Fig. 9 - Ghisa sferoidale EN GJS700-2 (100% perlite).
Analisi SEM "in-situ" della superficie laterale durante la prova di trazione.

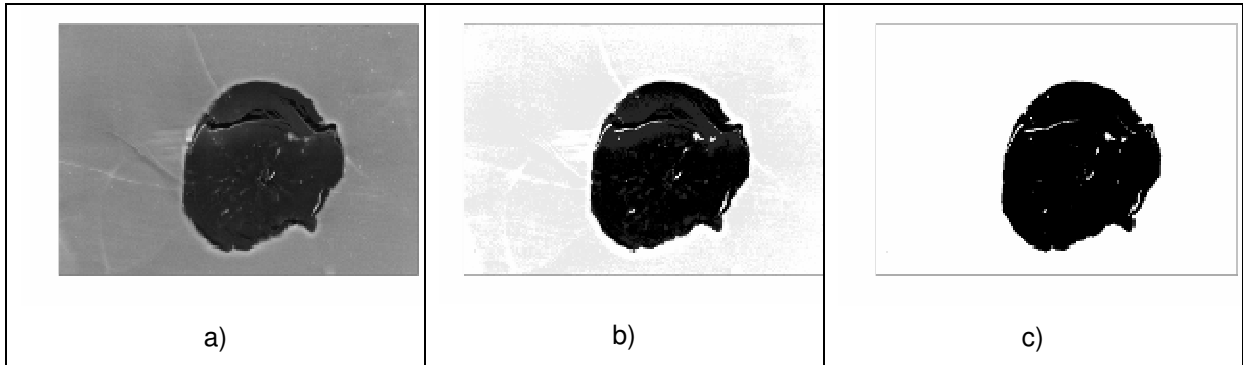


Fig.10 - a) Immagine originale; b) segmentazione a 4 livelli; c) nodulo isolato dallo sfondo

L'influenza della microstruttura sui i parametri morfologici è riportata nelle Fig. 11-13. E' evidente una elevata dispersione dei risultati per tutte le microstrutture investigate. In ogni caso è possibile evidenziare che:

- la ghisa a matrice ferritica risulta essere caratterizzata dalla dispersione minore, sia per quanto riguarda la diminuzione della solidità, che per quanto riguarda l'evoluzione dei diametri normalizzati degli sferoidi (in entrambe le direzioni); inoltre, nel caso del diametro misurato ortogonalmente alla direzione di applicazione del carico, risulta essere caratterizzato da un ridotto incremento (anzi, in alcuni casi da una diminuzione), confermando l'inesistenza del meccanismo di ingrossamento dei grani, e addirittura della loro coalescenza, nel caso di una matrice duttile come è da considerarsi appunto quella di una ghisa completamente ferritica;
- Anche la ghisa a matrice completamente perlitica mostra una ridotta variazione del diametro dello sferoide ortogonalmente alla direzione di applicazione del carico; considerando la matrice decisamente meno duttile rispetto a quella ferritica, tale risultato risulta comunque meno inaspettato;
- Le due ghise ferrito-perlitiche mostrano le maggiori differenze nella evoluzione del diametro normalizzato misurato ortogonalmente alla direzione di applicazione del carico, dove la ghisa costituita dal 50% di ferrite e dal 50% di perlite mostra quasi sempre un aumento del valore normalizzato; tale risultato è sicuramente legato alla peculiare distribuzione delle fasi.

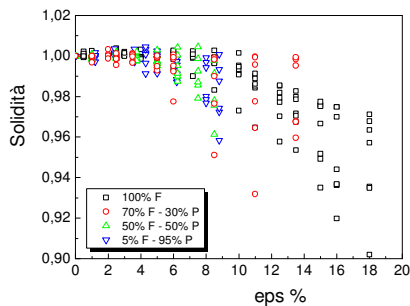


Fig. 11 - Influenza della microstruttura sulla evoluzione della Solidità durante la prova di trazione.

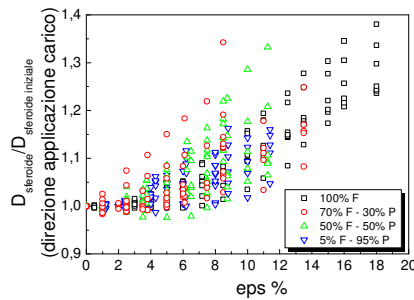


Fig. 12 - Influenza della microstruttura sulla evoluzione del diametro normalizzato dello sferoide nella direzione di applicazione del carico,

durante la prova di trazione.

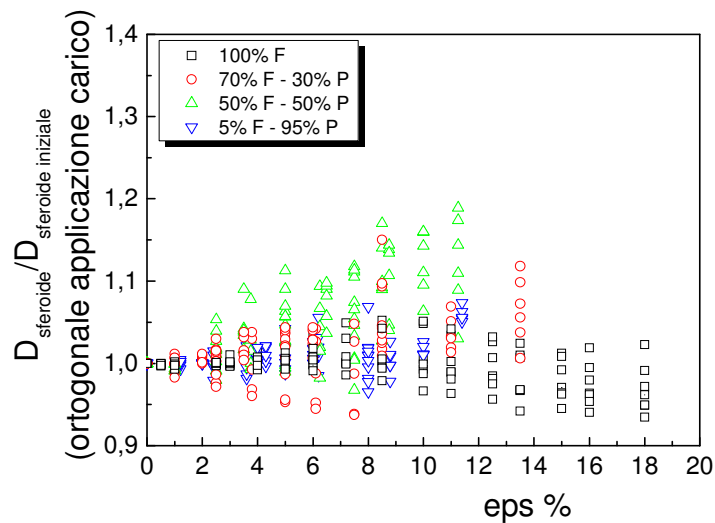


Fig. 13 - Influenza della microstruttura sulla evoluzione del diametro normalizzato dello sferoide ortogonalmente alla direzione di applicazione del carico, durante la prova di trazione.

Dall'analisi SEM delle superfici laterali durante lo sviluppo della prova di trazione è possibile evidenziare che i micromeccanismi di danneggiamento nelle ghise sferoidali sono influenzati sia dalle caratteristiche morfologiche degli elementi di grafite (forma, distribuzione dimensioni) che dalla microstruttura (distribuzione e frazione volumetrica delle fasi).

Considerando esclusivamente i micromeccanismi di danneggiamento degli elementi di grafite, si possono classificare le seguenti morfologie:

- Meccanismo di danneggiamento "a cipolla": il "cuore" del nodulo si distacca dalla parte più esterna del nodulo stesso mediante un meccanismo duttile (Fig. 5e ed f); è possibile ipotizzare un differente comportamento meccanico fra il "cuore" del nodulo ottenuto direttamente dalla ghisa fusa [2, 21, 22] ed il guscio di carbonio ottenuto mediante diffusione allo stato solido durante il raffreddamento. Una matrice metallica con maggiore duttilità (ferrite) corrisponde ad una maggiore deformazione dello sferoide. Le ghise sferoidali caratterizzate dalla minore duttilità non mostrano una completa deformazione duttile degli elementi.
- Innesco e propagazione di cricche radiali e trasversali: tale meccanismo di danneggiamento degli sferoidi solitamente si innesca negli elementi di grafite caratterizzati da una ridotta sferoidicità; alcune cricche radiali si innescano nel centro del nodulo, probabilmente in corrispondenza dei nuclei di solidificazione (ad esempio inclusioni non metalliche tipo MgS or CaS [2], che, comunque, non sono state osservate).
- Distacco della matrice metallica dai noduli di grafite (debonding): questo meccanismo di danneggiamento si innesca in corrispondenza dei "poli" dei noduli ed è caratterizzato da un meccanismo di innesco e propagazione, con una conseguente riduzione della deformazione plastica dell'elemento di grafite.

Considerando la matrice metallica, si possono identificare tre principali morfologie di danneggiamento, in funzione della presenza della ferrite (solitamente localizzata intorno o nelle vicinanze degli elementi di grafite):

- nelle ghise sferoidali contenenti ferrite il danneggiamento nella matrice metallica si innesca solitamente in corrispondenza delle interfacce matrice (ferrite) – noduli di grafite (ad esempio, Fig. 5e, 6b e 7c); le cricche trovano un percorso preferenziale là dove la distanza fra gli sferoidi è ridotta (Fig. 6d, e ed f).
- Considerando la ghisa sferoidale completamente perlitica, le cricche si innescano già in campo elastico (Fig. 9a) e propagano incrementando il livello di danneggiamento negli sferoidi (Fig. 9b e c).
- Per tutte le microstrutture considerate nel presente lavoro, è stato osservato l'incremento delle dimensioni della sede in cui sono contenuti gli sferoidi, con una evidente modifica della loro forma. Per tutte le ghise sferoidali investigate, l'aumento delle dimensioni delle sedi degli sferoidi non è basato su un meccanismo di crescita del vuoto (con lo sferoide considerato

come virtualmente inesistente), ma piuttosto risulta essere legato ai meccanismi di danneggiamento dei noduli precedentemente elencati (crescita di cricche, meccanismo “ a cipolla” e, solo parzialmente, al debonding nodulo di grafite – matrice). Inoltre la coalescenza dei vuoti non è stata osservata in nessun caso.

E' quindi possibile sottolineare il fatto che, fra i meccanismi di danneggiamento tipici delle ghise sferoidali, il distacco matrice – sferoide non è né l'unico, né il più importante. Inoltre, la crescita dei vuoti non è legata al debonding degli sferoidi, quanto piuttosto al danneggiamento dei medesimi mediante innesco e propagazione delle cricche al loro interno (Fig. 5e ed f). L'assunzione spesso adottata che le ghise sferoidali sono assimilabili ad un materiale poroso, con i noduli di grafite che sostanzialmente costituiscono dei vuoti all'interno di una matrice a comportamento elasto-plastico, risulta quindi essere riduttiva. Probabilmente questa assunzione può essere utilizzata con successo per simulare il comportamento meccanico delle ghise sferoidali mediante modelli costitutivi basati sulla crescita dei vuoti (ad esempio il modello GNT), grazie alla difficoltà nell'identificare alcuni parametri e nel loro significato fisico non completamente evidente. La mancata considerazione degli altri meccanismi di danneggiamento nei modelli basati sulla crescita dei vuoti può essere alla base del frequente scostamento fra i risultati numerici e quelli sperimentali.

4. CONCLUSIONI

Le ghise sferoidali sono caratterizzate da una interessante combinazione di colabilità (tipica delle ghise grigie) e di tenacità (tipica degli acciai), grazie alla peculiare forma degli elementi di grafite, ottenuta mediante il controllo della composizione chimica e non attraverso lunghi e costosi trattamenti termici, come nel caso delle ghise malleabili. Le loro proprietà meccaniche sono fortemente influenzate dalla microstruttura (ferritica, ferrito-perlitica, perlitica, bainitica, austenitica, martensitica). Considerato che l'identificazione dei micromeccanismi di danneggiamento nelle ghise sferoidali ferrito-perlitiche non è ancora completa, in questo lavoro è stata analizzata l'influenza della microstruttura sui tali meccanismi durante una prova di trazione, effettuando delle osservazioni al microscopio elettronico a scansione durante la prova di trazione medesima. Sulla base dei risultati sperimentali, è possibile riassumere le seguenti conclusioni:

- I micromeccanismi di danneggiamento sono notevolmente influenzati dalla microstruttura; il danneggiamento interessa sia gli elementi di grafite che la matrice metallica;
- Il distacco degli elementi di grafite dalla matrice non è il principale meccanismo di danneggiamento; altri micromeccanismi di danneggiamento sono più frequenti, quali, ad esempio, quello qui denominato “a cipolla”; la ghisa sferoidale completamente perlitica presenta un danneggiamento già nella fase elastica;
- Il danneggiamento della matrice nella ghisa sferoidale contenente ferrite (innesco di microcricche all'interfaccia matrice-sferoide e propagazione nella matrice ferritica) differisce dal meccanismo di danneggiamento nella ghisa completamente perlitica (cricche che si innescano nella matrice già durante la deformazione elastica);
- La crescita dei vuoti dovuta al distacco degli sferoidi ha una importanza ridotta, mentre sembra piuttosto essere dovuta all'innesco di cricche ed alla loro propagazione all'interno degli sferoidi.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Ward R.G., An introduction to the physical chemistry of iron and steel making, Arnold, London, 1962.
- [2] Labrecque C., Gagne M., Canadian Metallurgical Quarterly 1998; 37(5): 343.
- [3] Berdin C., Dong M.J., Prioul C., Engineering Fracture Mechanics 2001; 68: 1107.
- [4] Zhang K.S., Bai J.B., François D., International J. of Solids and Structures 1999; 36: 3407.
- [5] Guillermer-Neel C., Feaugas X., Clavel M., Metallurgical and Materials Transactions A 2000; 31A: 3063.
- [6] Gurson A.L., J. Engng. Mater. Technol. 1977; 99: 2.
- [7] Tvergaard V., J. Mech Phys Solids. 1982; 30: 265.
- [8] Needleman A., Tvergaard V., Acta Metall. 1984; 32: 157.
- [9] Dong M.J., Prioul C., François D., Metallurgical and Materials Transaction A. 1997; 28A(11):2245.
- [10] Liu J.H., Li G.L., Hao X.Y., Zeng D.B., Sun Zh.H, Materials Letters 2001: 50: 194.
- [11] Kachanov L. M., Time of Rupture Process Under Creep Conditions. 1958. IVZ Akad Nauk, SSR. Otd Tech Nauk. 8.
- [12] Rice J.R., Tracey D.M., J. Mech. Solids 1969; 17: 201.

- [13] Lemaitre J., Journal of Engineering Materials and Technology 1985; 107: 83.
 [14] Dai P.Q., He Z.R., Zheng C.M., Mao Z.Y., Materials Science and Engineering A 2001; 319-321: 531.
 [15] Eldoky L., Voigt R. C., AFS Trans 1985; 93: 621.
 [16] Voigt R. C., Eldoky L. M., Chiou H. S., AFS Trans. 1986; 94: 645.
 [17] Eldoky L., Voigt R. C., AFS Trans. 1986; 86-104: 631.
 [18] Liu J.H., Hao X.Y., Li G. L., Liu G. Sh., Materials Letters 2002; 56: 748.
 [19] Chan T.F., Vese L., IEEE Trans. on Image Proc. 2001; 10: 266.
 [20] De Santis A., Iacoviello D., DIS-Rep. n. 1305, submitted to International Journal of Computer Vision.
 [21] Lesoult G., Castro M., Lacaze J. Acta mater. 1998; 46(3): 983.
 [22] Lesoult G., Castro M., Lacaze J. Acta mater. 1998; 46(3): 997.
 [23] Aubert G., Vese L., SIAM J. Numer. Analysis 1997; 34: 5.

APPENDICE

Un'immagine I è definita come una matrice di numeri interi $\{I_{i,j}\}$ su una griglia di punti $D = \{(i, j), i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, M\}$. Senza perdita di generalità si può assumere una codifica a 8 bit per cui i valori interi sono compresi tra 0 e 255. Come caso particolare di segmentazione di I si consideri la rappresentazione costante a tratti: sia $\{D_k\}, k = 1, 2, \dots, K$ una partizione finita del dominio D con frontiera ∂D ; una segmentazione costante a tratti è definita come segue

$$I_s = \sum_{k=1}^K c_k \chi_{D_k}, \quad \chi_{D_k}(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{for } (i, j) \in D_k \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases} \quad (1)$$

dove $B = \left(\bigcup_{k=1}^K \partial D_k \right)$ è la frontiera della segmentazione (si noti che per definizione $\partial D \subset B$), i c_k

sono i valori costanti assegnati ad ogni sottoregione D_k scelti in un insieme di $n_C \leq K$ valori. Una semplice formulazione del problema di segmentazione è la seguente: *data un'immagine $I : D \rightarrow [0 \ 255]$, si scelga un intero $n_C \geq 2$ e si trovino una partizione $\{D_k\}, k = 1, 2, \dots, K$ di D e delle costanti c_1, \dots, c_K tali che I_s data dalla (1) sia una buona rappresentazione di I secondo un opportuno criterio di ottimo.*

Un criterio ragionevole consiste nell'ottimizzare l'errore di approssimazione ed una misura dell'efficienza della segmentazione: una buona segmentazione è costituita dal minimo numero di sottoregioni disgiunte con area minima e frontiera regolare. Ogni sottoregione può essere definita per mezzo delle *funzioni di livello*. Consideriamo per semplicità un'immagine con un solo oggetto differente dallo sfondo, per cui si avranno due sottoregioni D_1 , che corrisponde all'oggetto, e

$D_2 = D \setminus D_1$, che corrisponde allo sfondo. Sia $\phi = \{\phi_{i,j}\} : D \rightarrow R$ una funzione continua; D_1 e D_2 possono essere definite nel modo seguente

$$D_1 = \{(i, j) : \phi_{i,j} \geq 0\}, \quad D_2 = \{(i, j) : \phi_{i,j} < 0\} \quad (2)$$

La frontiera della segmentazione è nota una volta che siano individuati i punti di frontiera di D_1 e D_2 . Questi non sono semplicemente l'insieme di livello zero di ϕ , come nella formulazione nel continuo, ma devono essere definiti in base al numero di cambi di segno di ϕ in un opportuno intorno del pixel esaminato. In [19] è stata definita una funzione $\gamma(\phi_{i,j})$ che vale 1 se il pixel (i, j) è di frontiera e 0 nel caso contrario. A questo punto può essere definito il seguente funzionale di costo

$$E(c_1, c_2; \phi) = \lambda \sum_{i,j} H(\phi_{i,j}) (I_{i,j} - c_1)^2 + \lambda \sum_{i,j} (1 - H(\phi_{i,j})) (I_{i,j} - c_2)^2 + \frac{\alpha}{2} \sum_{i,j} \phi_{i,j}^2 + \mu \sum_{i,j} H(\phi_{i,j}) + \nu \sum_{i,j} \gamma(\phi_{i,j}) \quad (3)$$

dove $H(\cdot)$ è la funzione di Heaviside e $\lambda, \alpha, \mu, \nu$ sono parametri da fissare opportunamente in modo da pesare diversamente l'influenza dei vari termini dell'indice di costo. In [19] sono state trovate condizioni necessarie e sufficienti di minimo globale per la funzione (3)

$$c_1 = \frac{\sum_{i,j} H(\phi_{i,j}) I_{i,j}}{\sum_{i,j} H(\phi_{i,j})}, \quad c_2 = \frac{\sum_{i,j} (1 - H(\phi_{i,j})) I_{i,j}}{\sum_{i,j} (1 - H(\phi_{i,j}))} \quad (4)$$

$$\phi_{i,j} = -\frac{1}{\alpha} \left(\lambda p_{i,j} + \mu + \nu \sum_{\ell=1}^1 [(H(\phi_{i+\ell,j}) - H(\phi_{i,j})) - (H(\phi_{i,j+\ell}) - H(\phi_{i,j}))] q_{i,j} \right) \delta(\phi_{i,j}) \quad (5)$$

dove $p_{i,j}$ e $q_{i,j}$ sono funzioni ausiliarie opportunamente definite. Mentre le (4) forniscono in forma chiusa i valori ottimi di c_1, c_2 , la (5) può essere risolta mediante uno schema ricorsivo [19,23].