



Caratterizzazione dei micromeccanismi di danneggiamento a trazione delle ghise sferoidali mediante prove meccaniche "in-situ"

V. Piacente

*DiMSAT – Università degli studi di Cassino, Via G. Di Biasio 43 – 03043 Cassino (FR), Italia
piacente@unicas.it*

RIASSUNTO. In questo lavoro sono stati investigati meccanismi di rottura di ghise sferoidali ferritico-perlitiche considerando l'influenza della microstruttura. E' stata progettata e costruita una micromacchina di trazione di dimensioni tali da poter essere inserita nella camera di osservazione del microscopio elettronico a scansione (SEM) e sono state effettuate delle prove di trazione osservando la superficie laterale di microprovini in ghisa sferoidale preparati metallograficamente. L'osservazione effettuata durante lo svolgimento della prova ha permesso di identificare il contributo meccanismi di danneggiamento degli sferoidi di grafite che non sono limitati al distacco ("debonding") matrice-grafite, ma che, in funzione della microstruttura della matrice, possono essere decisamente più complessi.

ABSTRACT. In this paper, ferritic pearlitic ductile cast irons damaging micromechanisms were investigated, considering matrix microstructure influence. A micro tensile testing machine was optimized in order to be used inside a scanning electron microscope (SEM). Ductile iron micro-tensile specimens were metallographically prepared and observed during tensile tests. This procedure allowed to identify main graphite iron spheroids damaging micromechanisms: not only matrix-graphite nodules debonding was observed, but also other damaging mechanisms (e.g., "onion-like" damaging micromechanisms).

PAROLE CHIAVE: ghise sferoidali, meccanismi di danneggiamento.

1 INTRODUZIONE

Le ghise sferoidali sono caratterizzate da una ottima combinazione delle proprietà meccaniche: elevata duttilità, allungamenti a rottura anche superiore al 18%, elevata resistenza a trazione (fino a 850 MPa e, considerando le ghise austemperate, fino a 1600 MPa) ed un'ottima resistenza all'usura. La scelta della matrice e dei trattamenti termici permette di ottenere la combinazione ottimale delle proprietà meccaniche desiderate (Fig.1) [1-8].

In Fig.2 sono riportate alcune metallografie che mettono in evidenza l'aspetto microstrutturale di alcuni tipi di ghisa sferoidale.

La modellazione analitica sino ad oggi usata per la trattazione dei meccanismi di rottura è basata essenzialmente sul fenomeno del "debonding", ovvero il distacco o delaminazione degli sferoidi dalla matrice [8-11]. Questo fenomeno incide sulla resistenza meccanica. Infatti la matrice è solitamente considerata "porosa", dove i pori sono costituiti dalle cavità nella matrice degli sferoidi, considerando solo il distacco netto degli sferoidi e escludendo quest'ultimi da qualsiasi influenza nel meccanismo di rottura [12-13]. In questo lavoro, si è spostata l'attenzione sulla formazione e propagazione delle cricche sia nella matrice che negli sferoidi e sull'interazione del danneggiamento degli sferoidi sulla matrice.

Questi meccanismi, come si evince dalle osservazioni sperimentali di seguito descritte, sono fortemente influenzati dalla microstruttura e dalla distribuzione degli sferoidi stessi.

2 MATERIALI INVESTIGATI E METODOLOGIE

Sono stati utilizzati campioni provenienti da quattro tipi di ghise sferoidali, la cui composizione chimica è riportata in Tab. 1.

Sono stati realizzati microprovini in ghisa ad osso di cane di lunghezza pari a 25 mm e sezione resistente rettangolare di dimensioni pari a 2 x 1 mm. Per tale scopo è stata messa a punto una procedura di lavorazione meccanica consistente nella fresatura presso un centro di lavoro automatico di un massello di ghisa sferoidale, successivamente tagliato con macchine di precisione ed infine rettificato.

Il provino, prima di iniziare la prova di trazione, viene preparato tramite lucidatura e attacco chimico mediante nital 2% per evidenziare le fasi presenti.

L'attrezzatura utilizzata per la prova di trazione interrotta consente di interrompere la prova a step prestabiliti mentre il provino nella morsetta, rimanendo sotto carico, viene alloggiato nella camera del microscopio elettronico a scansione, per l'osservazione dello stato di

danneggiamento indotto.

La sequenza di tali operazioni, sino a giungere alla rottura, consente di avere il quadro completo dell'avanzamento del danneggiamento.

L'attrezzatura in oggetto è costituita da due parti principali:

- la morsetta dove sono alloggiati i mini provini di trazione;
- il posaggio meccanico che interagisce con la morsetta per l'esecuzione automatica della prova di trazione.

La morsetta (Fig. 3 a) consta di una sede per mini provini ad osso di cane piatti, di spessore max 1 mm. Una estremità della testa è mobile e la traversa di scorrimento è movimentata tramite una vite metrica M5, passo 0,8 mm. La geometria del sistema morsetta più provino consente di posizionare il baricentro al centro

del provino, che è il punto di posizionamento nell'alloggiamento del SEM. I materiali usati sono acciaio inox per la struttura, ottone per le guide. I materiali suddetti assicurano compatibilità con le emissioni del SEM. La morsetta descritta viene alloggiata all'interno di un posaggio meccanico: quest'ultimo costituisce la macchina capace di eseguire una prova di trazione e acquisirne i risultati. Difatti, una volta inserita la morsetta, un servomotore, tramite giunto, aggancia la testa della vite (Fig. 3 b). Contestualmente, una slitta pneumatica fa avanzare un LVDT (Linear Variable Differential Transformer) per la misura degli allungamenti, che si colloca a battuta sulla testa mobile della morsetta. La vite della morsetta scarica la sua forza di trazione su un piattino che a sua volta le trasmette sotto forma di compressione a due micro celle di carico da

| Ghisa sferoidale | C | Si | Mn | S | P | Cu | Cr |
|------------------------------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| EN GJS 350-22 (100% ferrite) | 3,66 | 2,72 | 0,18 | 0,013 | 0,021 | 0,022 | 0,028 |
| EN GJS 450-10 (70% ferrite) | 3,62 | 2,80 | 0,21 | 0,021 | 0,031 | 0,018 | - |
| EN GJS 500-7 (50% ferrite) | 3,65 | 2,72 | 0,18 | 0,010 | 0,030 | - | 0,05 |
| EN GJS 700-2 (5% ferrite) | 3,59 | 2,65 | 0,19 | 0,012 | 0,028 | 0,04 | 0,061 |

Tabella 1: Composizione chimica delle ghise sferoidali investigate

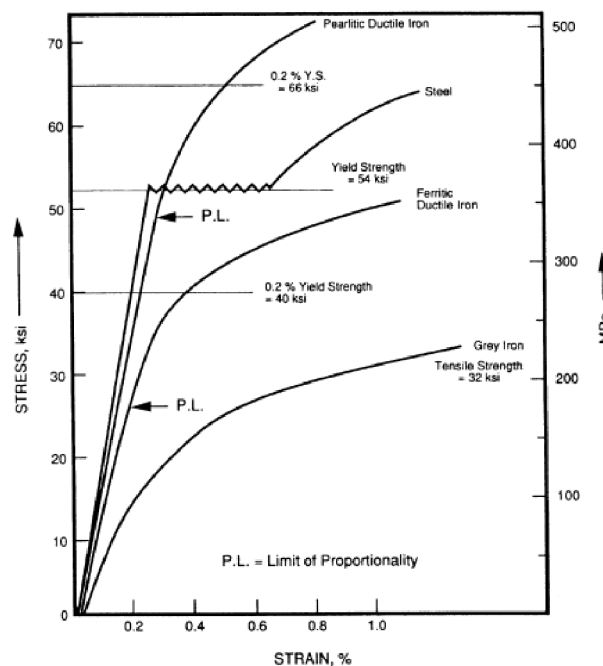


Figura 1: Influenza della microstruttura sulla resistenza a trazione delle ghise sferoidali.

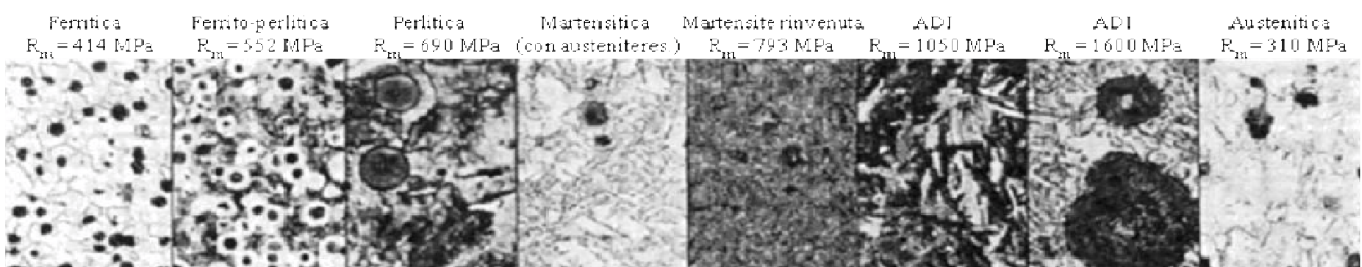


Figura 2: Microstrutture delle ghise sferoidali.

10000 N. La prova può avvenire, quindi, sia in controllo di forza che in controllo di spostamento.

3 RISULTATI SPERIMENTALI

I risultati per la ghisa completamente ferritica evidenziano che, sino al completamento del tratto elastico della prova di trazione, non ci sono danneggiamenti, né microvuoti nella matrice o negli sferoidi (Fig. 4a – b). Proseguendo la prova e quindi spostandosi sul tratto caratterizzato da deformazione plastica, cominciano ad evidenziarsi danneggiamenti sotto forma di microcricche negli sferoidi. La morfologia osservata è lo sfaldamento una denominato “a buccia di cipolla” (Fig. 4c – d). Per alti valori di sollecitazione, si evidenzia la deformazione plastica della matrice oltre che il proseguire

del danneggiamento degli sferoidi (Fig. 4e – d). Durante queste estraneo prove non è stato osservato alcun fenomeno di “debonding” tra matrice e sferoidi.

La ghisa sferoidale 70% ferritica – 30% perlitica permette di osservare una diversa evoluzione del danno. Infatti se nel tratto elastico non si evidenziano danneggiamenti né nella matrice, né negli sferoidi, (Fig. 5a – b), in corrispondenza del tratto plastico si osserva una evidente deformazione plastica a carico della matrice (principalmente la ferrite) che coinvolge anche l’interfaccia con gli sferoidi, iniziando a manifestarsi il fenomeno di “debonding” (Fig. 5c – d). Proseguendo la prova si esplicita in maniera sempre più evidente il fenomeno richiamato, accompagnandosi da cricche formatesi a carico della matrice (Fig. 5e – f).

La ghisa sferoidale 50% ferritica – 50% perlitica evidenzia assenza di danneggiamento in campo elastico sia

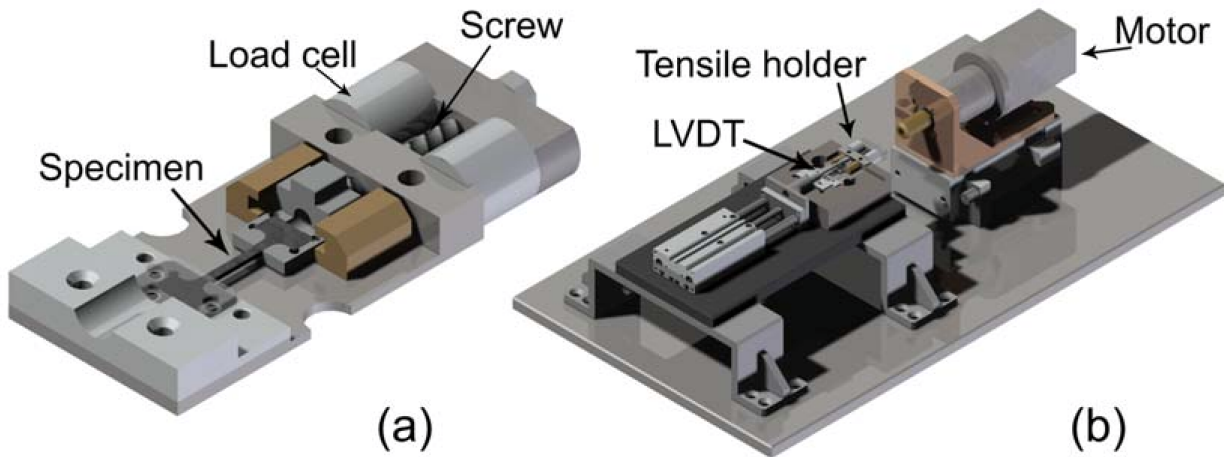


Figura 3: Macchina utilizzata per le prove di trazione: a) morsetta per alloggiamento microprovino, b) complesso della morsetta con attuazione e strumentazione.

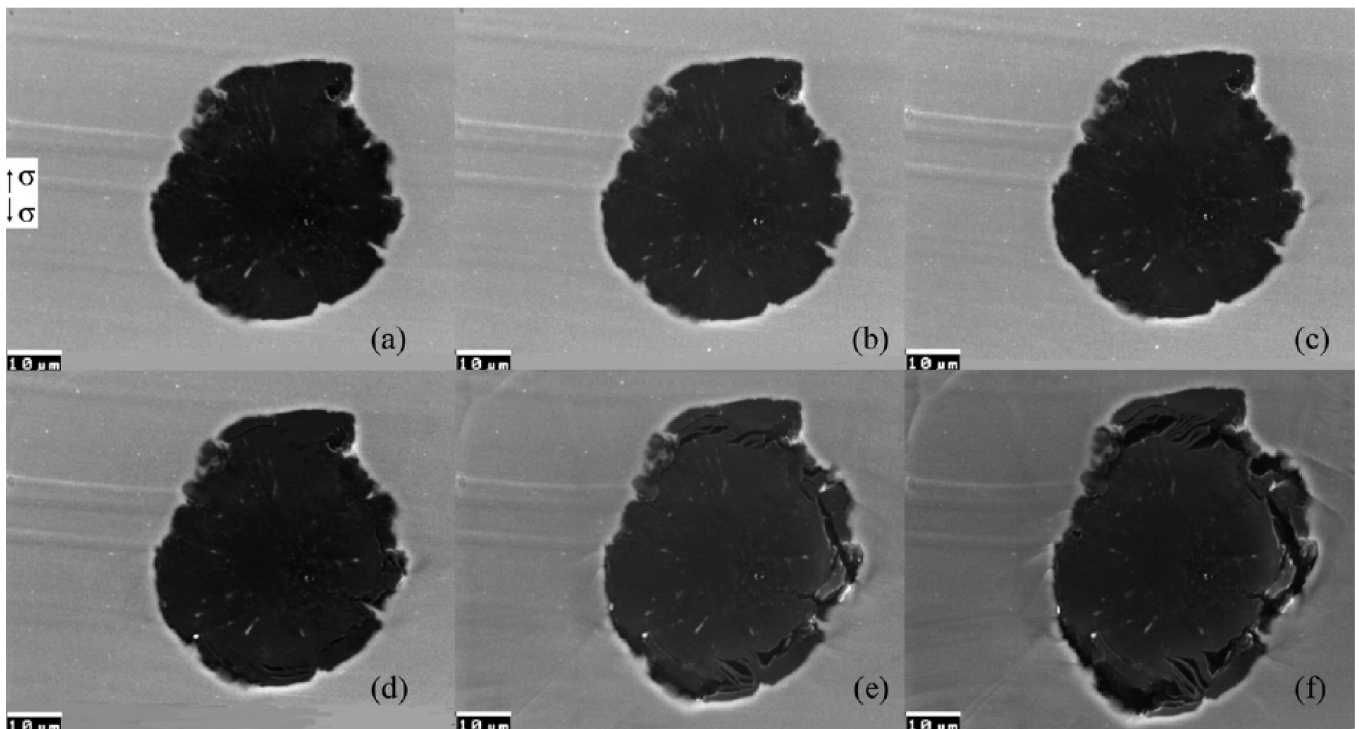


Figura 4: Evoluzione del danneggiamento nella ghisa sferoidale completamente ferritica: a) $\sigma=200\text{MPa}-\epsilon=1\%$, b) $\sigma=400\text{MPa}-\epsilon=2,5\%$, c) $\sigma=430\text{MPa}-\epsilon=5\%$, d) $\sigma=470\text{MPa}-\epsilon=7,5\%$, e) $\sigma=490\text{MPa}-\epsilon=12,5\%$, f) $\sigma=500\text{MPa}-\epsilon=17,5\%$.

per matrice che per sferoidi (Fig. 6a). L'osservazione in campo plastico evidenzia presenza di cricche a carico degli sferoidi e evidente deformazione plastica della matrice (principalmente a carico della ferrite) (figura 6b). Per alti valori di sollecitazione si evidenziano aumento considerevole di cricche in avanzamento negli sferoidi e formazione di cricche anche a carico della matrice ferritica (Fig. 6c – e). Per contro non si sono osservati fenomeni di “debonding”.

La ghisa sferoidale completamente perlitica presenta assenza di danneggiamento solo per valori di sollecitazioni molto bassi (Fig. 7a). Infatti per valori crescenti di sollecitazione, ma sempre in campo elastico, si osserva formazione di cricche sia a carico degli sferoidi (Fig. 7b), sia a carico della matrice (Fig. 8a). Valori di sollecitazione più elevati amplificano i fenomeni descritti, con incremento e sviluppo di cricche a carico degli sferoidi (Figg. 7c – f) e a carico della matrice (Figg. 8b – c). Nelle osservazioni sperimentali effettuate si sono evidenziate solo raramente fenomeni di “debonding”.

4 CONCLUSIONI

Le osservazioni effettuate sui microprovini di trazione realizzati nelle quattro tipologie di ghisa sferoidale investigata hanno permesso di identificare alcune tipologie di danneggiamento, sia della matrice che degli sferoidi che possono essere aggiunti a quelli attualmente disponibili in letteratura quali ad esempio il debonding. Da queste osservazioni è possibile affermare che:

- i meccanismi di danneggiamento dipendono stretta-

mente dalla natura della microstruttura, distribuzione degli sferoidi e i fenomeni osservati implicano sia la matrice che gli sferoidi stessi;

- il fenomeno del “debonding” tra matrice e sferoidi disponibile in letteratura come il più importante, è stato osservato raramente: anzi, quando presente, non sembra essere il più caratterizzante. Inoltre, nelle ghise sferoidali completamente perlitiche, si osserva un danneggiamento della matrice già in fase elastica;

- il danneggiamento della matrice in ghise sferoidali completamente ferritiche differisce completamente da quello osservato in ghise sferoidali completamente perlitiche (ove si osserva irreversibilità già in campo elastico);

- la crescita dei vuoti dovuti al debonding tra matrice e sferoidi è meno evidente del danneggiamento osservato a carico degli sferoidi.

5 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] J.H. Liu, X.Y. Hao, G.L. Li, G. Sh. Liu, *Materials Letters*, 56 (2002) 748.
- [4] J.H. Liu, G.L. Li, G. Sh. Liu, X.Y. Hao, *Materials Letters*, 58 (2004) 1051.
- [5] N. Bonora, A. Ruggero, *Int. Journal of Solids and Structures*, 42 (2005) 1401.
- [6] F. Iacoviello, O. Di Bartolomeo, V. Di Cocco, V. Pia-

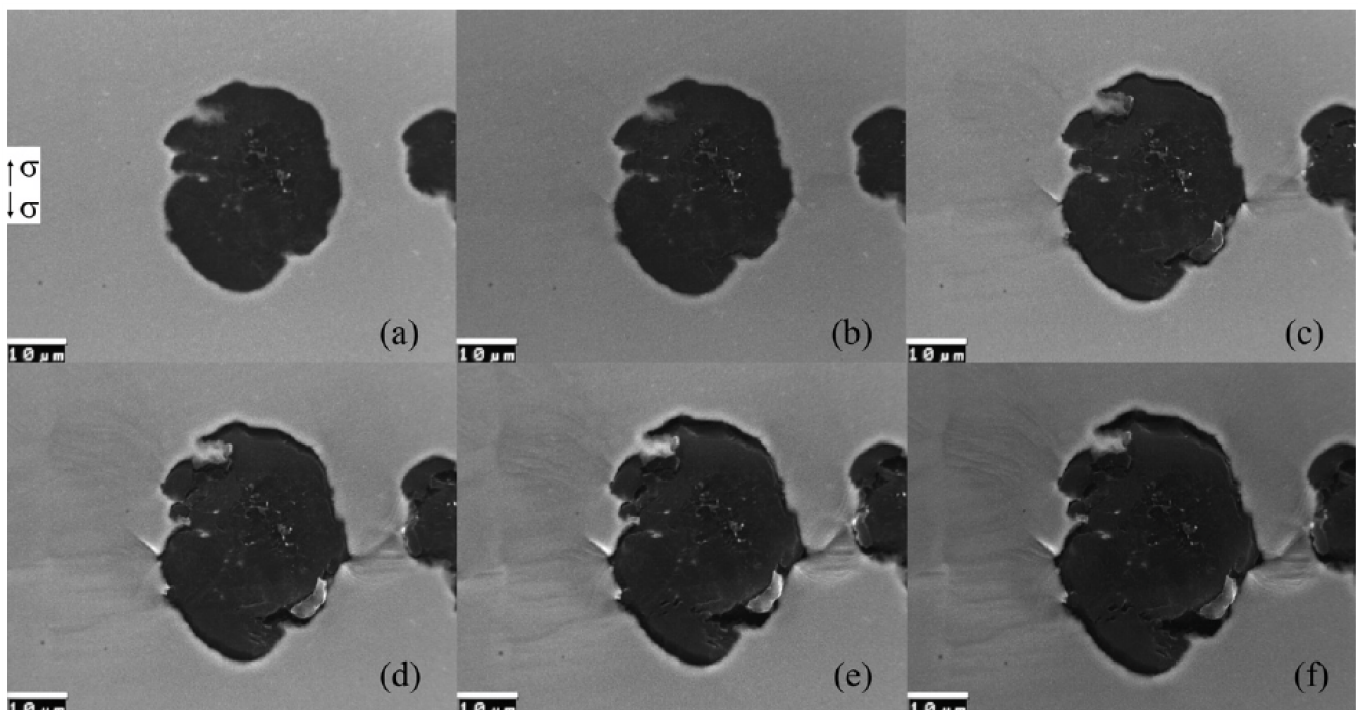


Figura 5: evoluzione del danneggiamento nella ghisa sferoidale 70% ferritica – 30% perlitica: a) $\sigma=260\text{MPa}-\epsilon=1,5\%$, b) $\sigma=380\text{MPa}-\epsilon=3\%$, c) $\sigma=430\text{MPa}-\epsilon=7\%$, d) $\sigma=450\text{MPa}-\epsilon=10\%$, e) $\sigma=460\text{MPa}-\epsilon=12,5\%$, f) $\sigma=470\text{MPa}-\epsilon=16,5\%$.

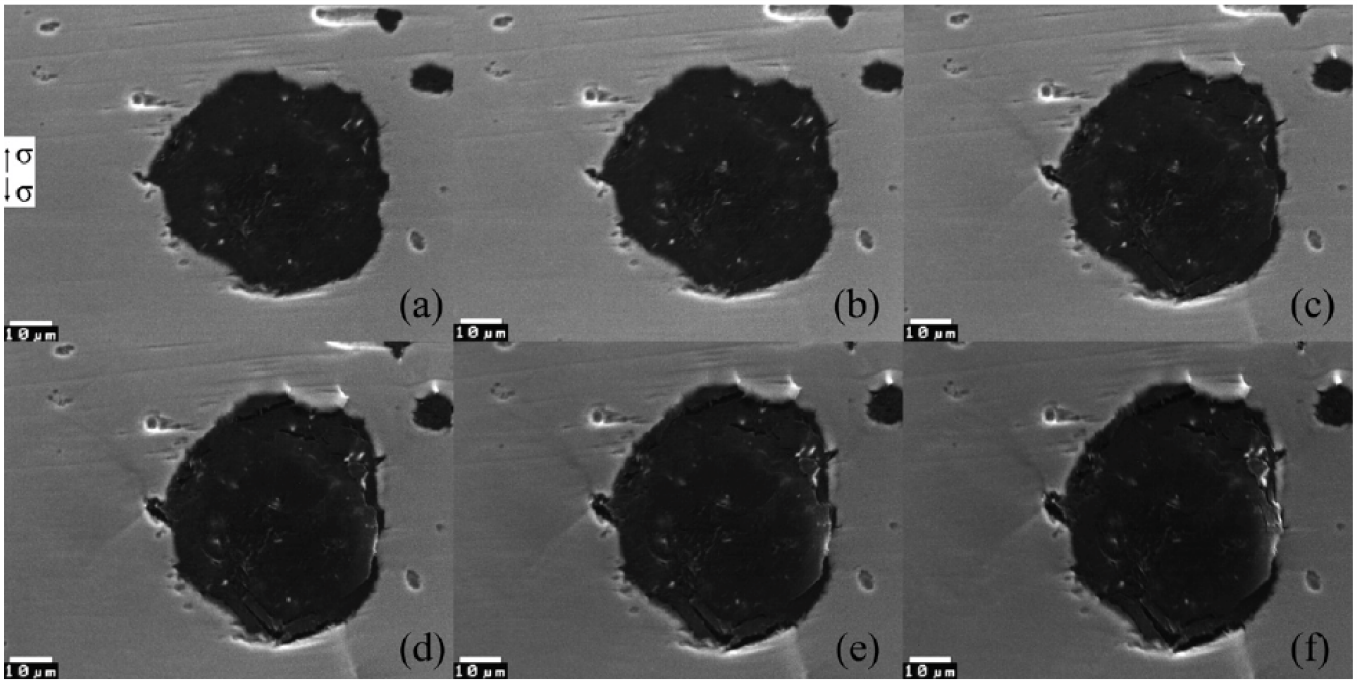


Figura 6: Evoluzione del danneggiamento nella ghisa sferoidale 50% ferritica – 50% perlitica: a) $\sigma=350\text{MPa}$ - $\epsilon=2,5\%$, b) $\sigma=450\text{MPa}$ - $\epsilon=3,5\%$, c) $\sigma=580\text{MPa}$ - $\epsilon=6\%$, d) $\sigma=630\text{MPa}$ - $\epsilon=8\%$, e) $\sigma=650\text{MPa}$ - $\epsilon=9,5\%$, f) $\sigma=660\text{MPa}$ - $\epsilon=11\%$.

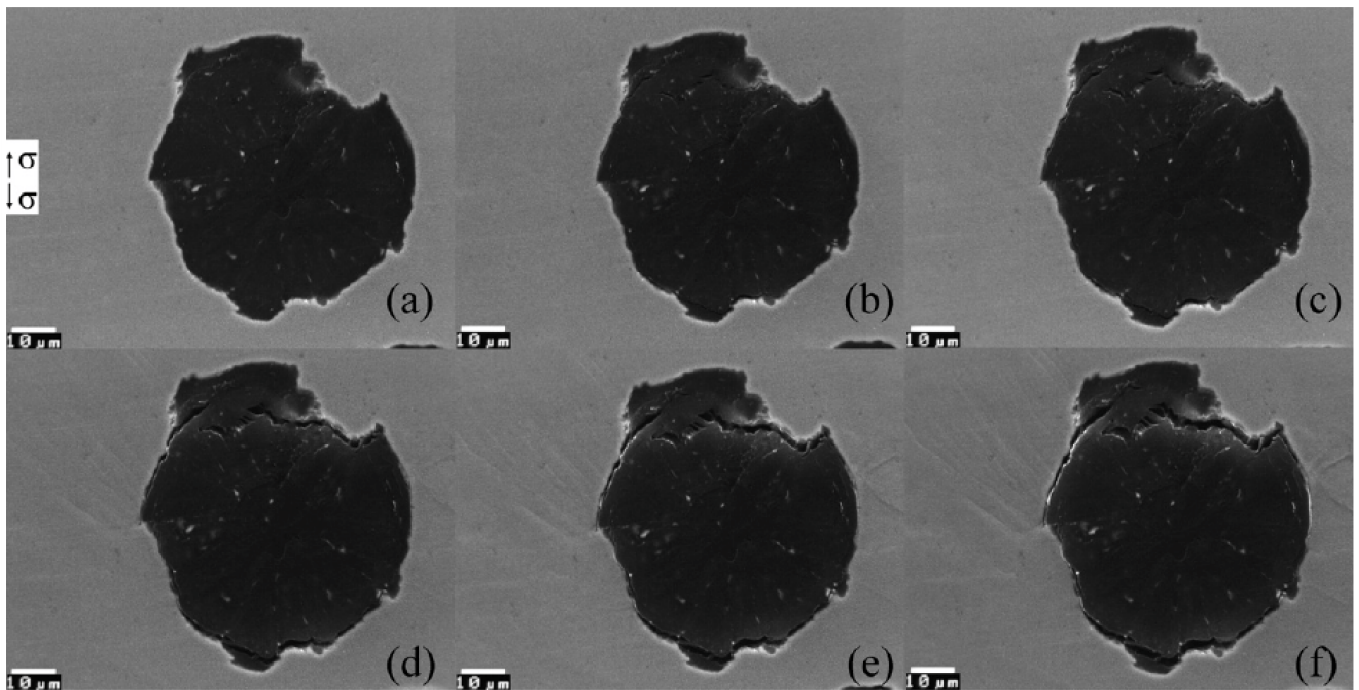


Figura 7: Evoluzione del danneggiamento nella ghisa sferoidale completamente perlitica: a) $\sigma=130\text{MPa}$ - $\epsilon=1\%$, b) $\sigma=520\text{MPa}$ - $\epsilon=3,5\%$, c) $\sigma=600\text{MPa}$ - $\epsilon=4\%$, d) $\sigma=760\text{MPa}$ - $\epsilon=6\%$, e) $\sigma=810\text{MPa}$ - $\epsilon=8,5\%$, f) $\sigma=840\text{MPa}$ - $\epsilon=10,5\%$.

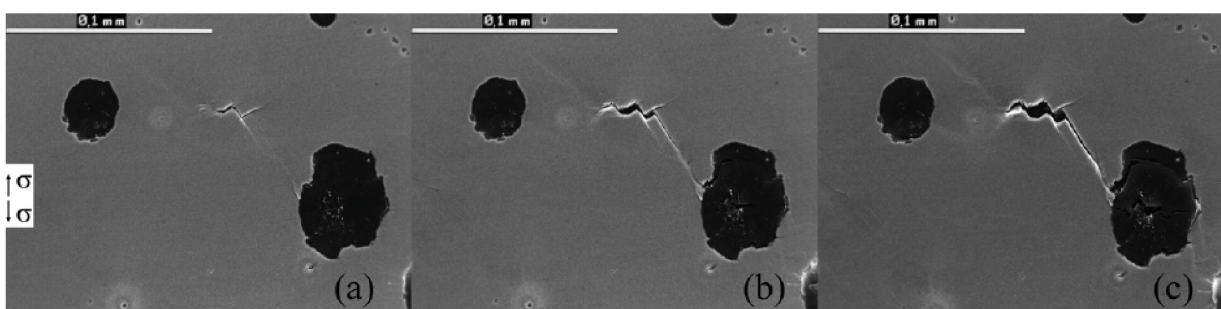


Figura 8: Danneggiamento della matrice nella ghisa sferoidale completamente perlitica: a) $\sigma=600\text{MPa}$ - $\epsilon=4\%$, b) $\sigma=780\text{MPa}$ - $\epsilon=6,5\%$, c) $\sigma=840\text{MPa}$ - $\epsilon=10,5\%$.

- cente, Mater. Science and Engineering A, 478 (2008) 181.
- [7] C. Berdin, M.J. Dong, C. Prioul, Eng. Fract. Mech., 68 (2001) 1107.
- [8] G. Lesoult, M. Castro, J. Lacaze, Acta mater., 46(3) (1998) 983.
- [9] G. Lesoult, M. Castro, J. Lacaze, Acta mater., 46(3) (1998) 997.
- [10] P.Q. Dai, Z.R. He, C.M. Zheng, Z.Y. Mao, Materials Science and Engineering A, 319-321 (2001) 531.
- [11] L.R. Jenkins, R.D. Forrest, Ductile Iron, in Properties and selection: iron, steels and high performance alloys. ASM Handbook, Metal Park (OH) ASM International, 1, 35.
- [12] M. Cavallini, O. Di Bartolomeo, F. Iacoviello, Fatigue Crack Paths (CP2006), Parma (2006), 13.
- [13] M. Cavallini, O. Di Bartolomeo, F. Iacoviello, Engineering Fracture Mechanics, 75 (2008), 694.