



Meccanismi di danneggiamento in una ghisa sferoidale a matrice ferritica

Vittorio Di Cocco, Francesco Iacoviello, Valentino Piacente

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

RIASSUNTO. Le ghise sferoidali associano alle caratteristiche tipiche delle ghise (ad esempio, una elevata colabilità), una elevata resistenza alle sollecitazioni statiche e cicliche, grazie alla particolare forma della grafite, ottenuta non attraverso lunghi e costosi trattamenti termici come nelle ghise malleabili, ma attraverso il controllo della composizione chimica. I trattamenti termici vengono effettuati quindi con l'obiettivo di controllare la microstruttura della matrice, esaltando in tal modo qualche particolare proprietà (ad esempio, resistenza a trazione, resistenza ad usura, etc.), ottenendo in tal modo ghise a matrice ferritica, perlitica, ferrito-perlitica, martensitica, austenitica, etc.. Nel caso delle ghise ferritiche, il principale meccanismo di danneggiamento identificato in letteratura è il distacco degli sferoidi dalla matrice metallica (*debonding*), e sono state implementate numerose leggi analitiche finalizzate a descrivere la crescita dei vuoti conseguenti, considerando sostanzialmente trascurabile il ruolo svolto dalla matrice. In questo lavoro è stata effettuata una analisi sperimentale dei micromeccanismi di danneggiamento in una ghisa sferoidale utilizzando una prova di trazione su provino intagliato ed osservato al microscopio elettronico a scansione durante lo svolgimento della prova.

PAROLE CHIAVE. Ghisa sferoidale ferritica; Meccanismi di danneggiamento.

INTRODUZIONE

Le ghise sferoidali sono caratterizzate da elevate caratteristiche meccaniche (resistenza a trazione, tenacità). Il loro comportamento meccanico dipende sia dalle caratteristiche morfologiche della grafite (morfologia, dimensioni e distribuzione dei noduli di grafite) sia dalla microstruttura della matrice (Fig. 1). Infatti, si possono ottenere elevati valori della duttilità nelle ghise con matrice ferritica (superiori al 18%) oppure di resistenza a trazione (fino ad 850MPa e, considerando le ghise austemperate, di più recente ottimizzazione, fino a 1600 MPa), conservando sempre una elevata resistenza all'usura. Spesso la microstruttura della matrice viene utilizzata per classificare le differenti tipologie di ghise sferoidali [1, 2], secondo le seguenti tipologie (Fig. 2):

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

L'analisi del ruolo svolto dagli sferoidi di grafite nel danneggiamento di ghise sferoidali sottoposte a sollecitazioni statiche o quasi statiche ha spesso identificato il distacco duttile della matrice metallica dallo sferoide (*debonding*) come l'unico

micromeccanismo di danneggiamento realmente efficace [4-8], considerando l'evoluzione del danneggiamento come costituita dalle seguenti fasi:

- distacco fra gli sferoidi di grafite e la matrice metallica;
- deformazione plastica intorno agli sferoidi di grafite;
- innesco di microcricche nella matrice deformata;
- propagazione delle microcricche, a collegare gli sferoidi fra loro, fino a formare microcricche più lunghe;
- formazione di macrocricche.

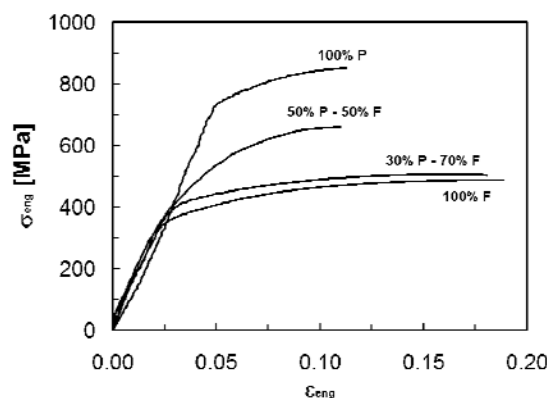


Figura 1: Influenza della microstruttura sulla resistenza a trazione nelle ghise sferoidali ferrite-perlitiche [3].

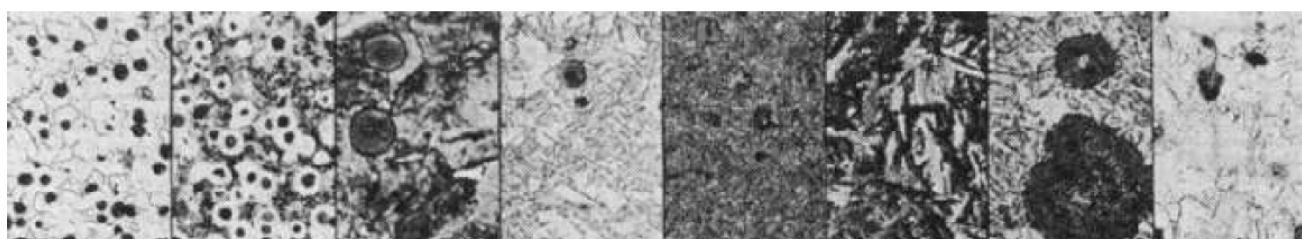


Figura 2: Differenti microstrutture nelle ghise sferoidali. Da sinistra verso destra (con differenti ingrandimenti): ferritica, ferrite-perlitica, perlitica, martensitica, bonificata, austemperata ($R_m = 1050$ MPa), austemperata ($R_m = 1600$ MPa), austenitica [2].

Secondo questo meccanismo, il ruolo della grafite è stato considerato come trascurabile e numerosi studi si sono 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 proposte, fra le quali il modello di Gurson modificato da Tvergaard-Needleman (modello GNT) [9-11] è spesso preferito. Considerando delle ghise sferoidali completamente ferritiche, Berdin et al. [9] hanno proposto che queste sono da considerarsi alla stregua di un materiale poroso, con i noduli di grafite assimilabili a vuoti all'interno di una matrice elasto-plastica. Durante la sperimentazione sono state osservate delle microcricche all'interno dei noduli di grafite, ma la loro presenza non è stata considerata come rilevante. Il distacco dei noduli di grafite dalla matrice (debonding) è stato quindi considerato come il solo meccanismo di danneggiamento realmente efficace. Il distacco degli sferoidi dalla matrice si innesca in corrispondenza dei "poli" dello sferoide di grafite [4], in corrispondenza del carico di snervamento della ghisa (Fig. 3a). L'incremento della deformazione plastica macroscopica comporta la crescita di vuoto nella direzione di applicazione del carico, formando in tal modo una cavità ellissoidale all'interno della quale si trovano i noduli di grafite praticamente immutati (Fig. 3b), fino ad ottenere la rottura del pezzo per coesione di vuoti adiacenti.

Gli autori del presente lavoro hanno evidenziato, in attività sperimentali precedenti al presente lavoro [3, 12], come tale meccanismo non riesce ad essere rappresentativo di tutti i meccanismi di danneggiamento che effettivamente agiscono all'interno delle ghise sferoidali, ma, piuttosto, hanno mostrato come il distacco matrice-sferoide "puro" venga osservato piuttosto raramente: altri meccanismi di danneggiamento sono decisamente più frequenti, quali, ad esempio un meccanismo "a cipolla", in cui lo sferoide vede un progressivo danneggiamento mediante una sua "esfoliazione", e la nascita di cricche interne, spesso esattamente al centro dello sferoide (Fig. 4).

L'obiettivo di questo lavoro è stato, quindi, l'approfondimento dei meccanismi di danneggiamento in una ghisa sferoidale a matrice ferritica mediante una prova di trazione effettuata utilizzando un provino di trazione con intaglio, ed osservando



al SEM i differenti meccanismi di danneggiamento che vengono ad attivarsi, sia durante lo svolgimento della prova, che al termine della medesima.

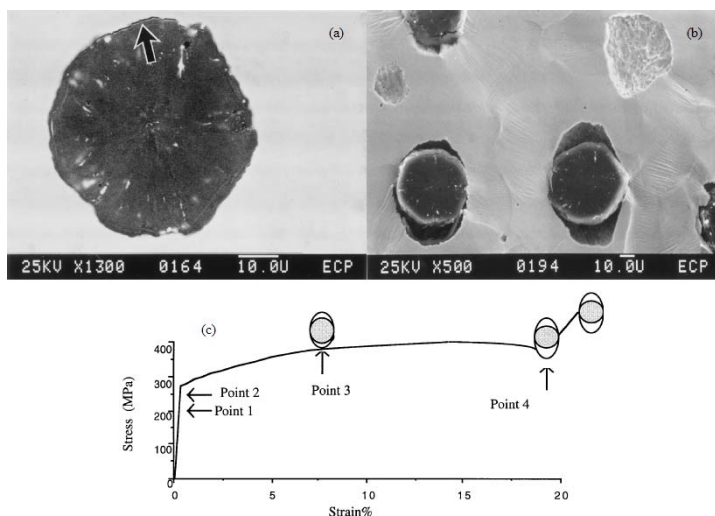


Figure 3: Distacco matrice-noduli di grafite durante una prova di trazione [9], osservazione SEM.

- a) distacco localizzato all'interfaccia in corrispondenza del punto 2 della curva $\sigma - \epsilon$;
- b) crescita delle cavità intorno ai noduli in corrispondenza del punto 3 della curva $\sigma - \epsilon$;
- c) Curva $\sigma - \epsilon$ registrata durante la prova di trazione.

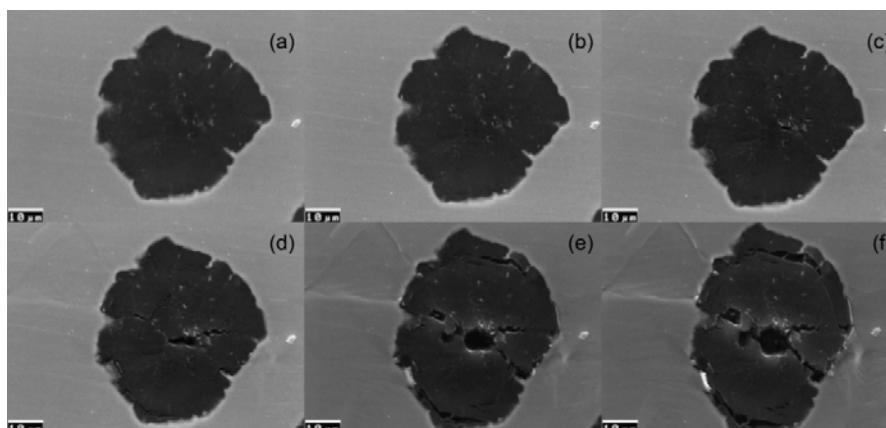


Figura 4: Ghisa sferoidale ferritica EN GJS350-22 ductile cast iron. Analisi SEM della evoluzione del danneggiamento in corrispondenza dei seguenti valori di σ [MPa]- ϵ %: (a) 200-1%, (b) 400-2.5%, (c) 430-5%, (d) 470-7.5%, (e) 490-12.5% and (f) 500-17.5%. La direzione di sollecitazione è verticale.

MATERIALE INVESTIGATO E METODOLOGIE NUMERICHE E SPERIMENTALI

È stata considerata una ghisa sferoidale con matrice completamente ferritica (Tab.1), caratterizzata da una elevata nodularità degli elementi di grafite (EN GJS350-22). Al fine di analizzare l'influenza della triassialità sui meccanismi di danneggiamento, sono stati preparati dei microprovini di trazione a sezione rettangolare con il tratto utile caratterizzato dalle seguenti misure: 25 x 2 x 1 mm, con un intaglio centrale (Fig. 5).

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 (EN GJS350-22).

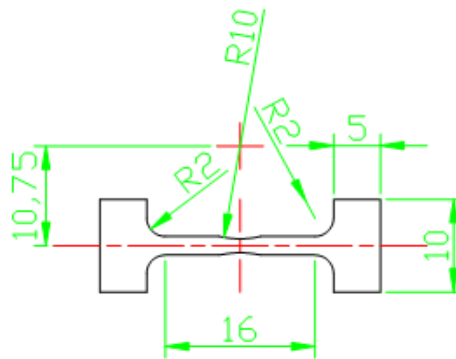


Figura 5: Microprovino di trazione con intaglio centrale.

I provini preparati metallograficamente, sono stati 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). Durante lo sviluppo della prova, in corrispondenza di ogni interruzione, è stata osservata l'evoluzione del danneggiamento in corrispondenza di differenti punti nella zona centrale del provino. 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).

Nella Fig. 6 sono mostrati sia l'afferraggio removibile che la macchina di trazione. Al termine della prova di trazione, la superficie laterale del provino è stata osservata al SEM identificando lo stato di danneggiamento in corrispondenza delle differenti posizioni. Al fine di determinare lo stato tensionale all'interno della parte centrale del provino, è stata effettuata una analisi agli elementi finiti. Grazie alla duplice simmetria secondo gli assi longitudinale e trasversale sia della geometria del provino che delle sollecitazioni, è stato sufficiente analizzare solo un quarto di geometria (Fig. 7). La discretizzazione è stata effettuata prestando particolare cura alla zona raccordata dell'intaglio, dove si è costruita una mesh i cui elementi sono caratterizzati da bassa distorsione. Per la costruzione della mesh sono stati utilizzati elementi parametrici a quattro nodi ad integrazione completa, in condizioni di sforzo piano. L'ipotesi di comportamento isotropo del materiale è stata rispettata scegliendo volumi di controllo sufficientemente grandi da contenere un elevato numero di sferoidi e di grani ferritici, soprattutto nelle zone interne dell'intaglio di maggiore interesse. La relazione sforzi-allungamenti è stata rilevata da prove di trazione su provini cilindrici uniassiali standard i cui valori in campo plastico sono stati interpolati attraverso una *power law* del tipo:

$$\sigma = A (\epsilon_0 + \epsilon_p)^m$$

dove A ed m sono i coefficienti della *power law*, ϵ_0 è la deformazione iniziale ed ϵ_p è la deformazione plastica del provino. Nella Tab.2 sono riportati tutti i valori relativi alla curva elasto-plastica utilizzata nella simulazione FEM.

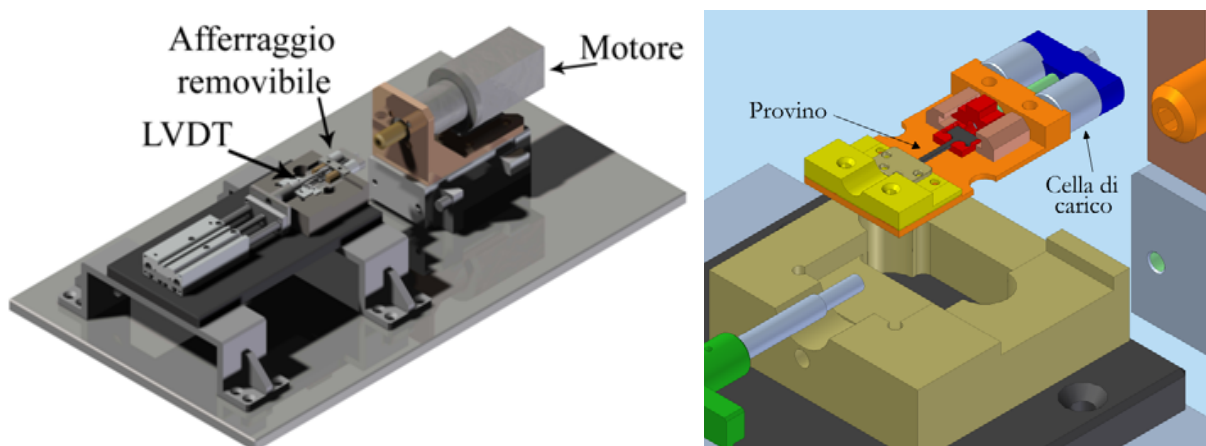


Figura 6: Macchina di trazione (a sinistra) ed afferraggio removibile con provino (a destra).

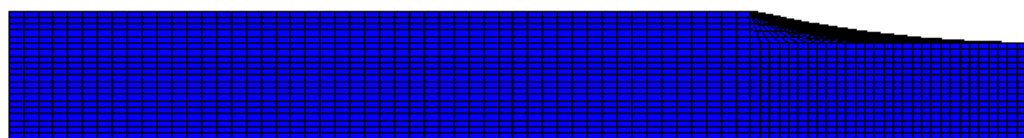


Figura 7: Modello geometrico discretizzato utilizzato nella simulazione FEM.

E [GPa]	ν	A	m
205	0.4	555	0.05

Tabella 2: Proprietà meccaniche della ghisa sferoidale ferritica.

I risultati del calcolo sono stati analizzati in termini di tensione equivalente di Von Mises ed i valori finali dopo la rottura del provino, sono stati riportati su una curva di trazione ottenuta da un provino uniassiale. In tal modo, è stato possibile correlare lo sforzo equivalente ad uno stato di tensione piano secondo le ipotesi di Von Mises, con le osservazioni del danno microstrutturale riscontrato all'interno del volume di controllo. Infine, l'osservazione di zone in cui non si avuto danneggiamento hanno messo in evidenza quali sono gli stati tensionali limite in corrispondenza dei quali non si è evidenziato un danneggiamento del materiale, definendo quindi una soglia di danneggiamento utilizzando il criterio di Von Mises.

RISULTATI E COMMENTI

L'analisi dell'evoluzione del danneggiamento durante lo svolgimento della prova di trazione conferma la presenza di meccanismi di danneggiamento alternativi al "puro" distacco matrice-sferoide, anche in presenza di elevata triassialità. Considerando uno sferoide nella zona centrale della sezione minima del provino, l'evoluzione della sollecitazione equivalente di Von Mises in corrispondenza di detto sferoide è riportata in Fig. 8. In questa figura sono anche indicati con le lettere a-d i valori in corrispondenza dei quali sono state effettuate le osservazioni SEM (Fig. 9). L'incremento della sollecitazione equivalente di Von Mises comporta l'innescò e la propagazione di cricche all'interno dello sferoide (Fig. 9 a, c), e la generazione di linee di scorrimento. Queste divengono sempre più evidenti con l'incremento della sollecitazione. In corrispondenza del punto d della Fig. 8, si verifica una diminuzione della sollecitazione equivalente di Von Mises, con l'innescò della cricca all'interno della matrice ferritica. Considerata l'elevata frequenza con cui detto meccanismo viene osservato sulla superficie del provino, l'analisi dell'evoluzione del danneggiamento nel provino intagliato conferma i risultati già ottenuti con provino liscio [3], ovvero che il distacco matrice-sferoide (debonding) non è né l'unico né il principale meccanismo di danneggiamento e che lo sferoide non rimane praticamente immutato durante lo svolgimento della prova ma che, piuttosto, si disgrega, talvolta con cricche vanno ad "esfoliare" il nodulo (secondo un meccanismo "a cipolla"), altre volte innescando e propagando una o più cricche nella zona centrale dello sferoide stesso.

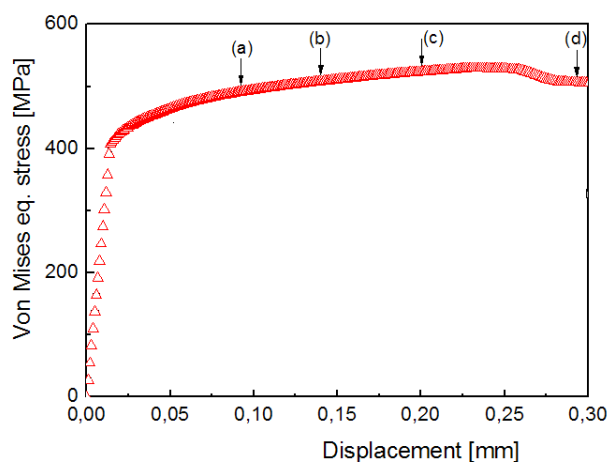


Figura 8: Evoluzione della sollecitazione equivalente di Von Mises per lo sferoide analizzato in Fig. 9.

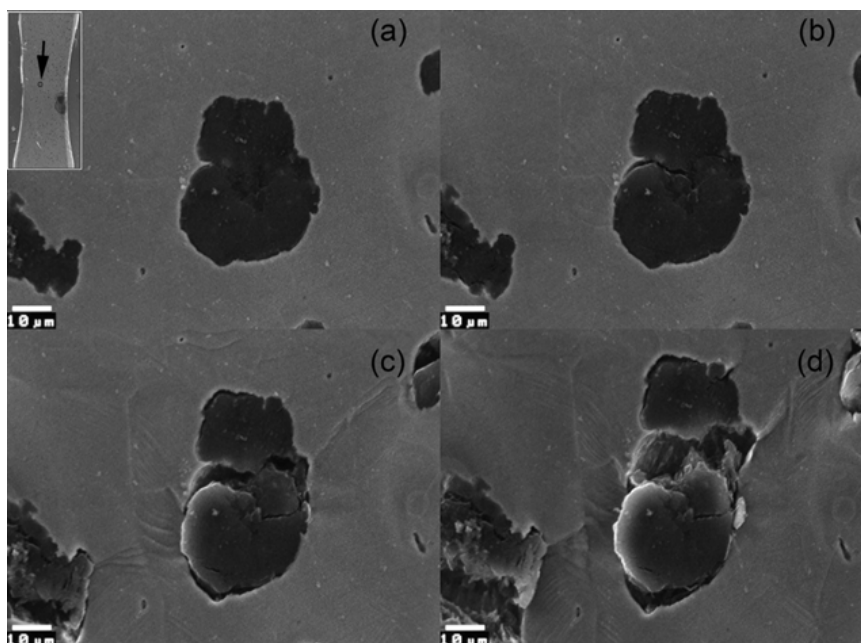


Figura 9: Analisi SEM della evoluzione del danneggiamento nella ghisa sferoidale ferritica (la freccia indica la posizione del nodulo analizzato).

Nella Fig. 10 sono riportate le posizioni in cui sono state effettuate le osservazioni SEM al termine della prova di trazione. Ognuno dei punti osservati, infatti risulta essere caratterizzato da un diverso valore della sollecitazione raggiunto al momento della rottura del provino intagliato, ed è stata effettuata una analisi dello stato di danneggiamento, insieme alla caratterizzazione dello stato tensionale mediante elementi finiti al fine di determinare le condizioni di sollecitazione in corrispondenza dei quali si attivano i meccanismi di danneggiamento. Le osservazioni sono state effettuate in corrispondenza sia degli sferoidi che della matrice.

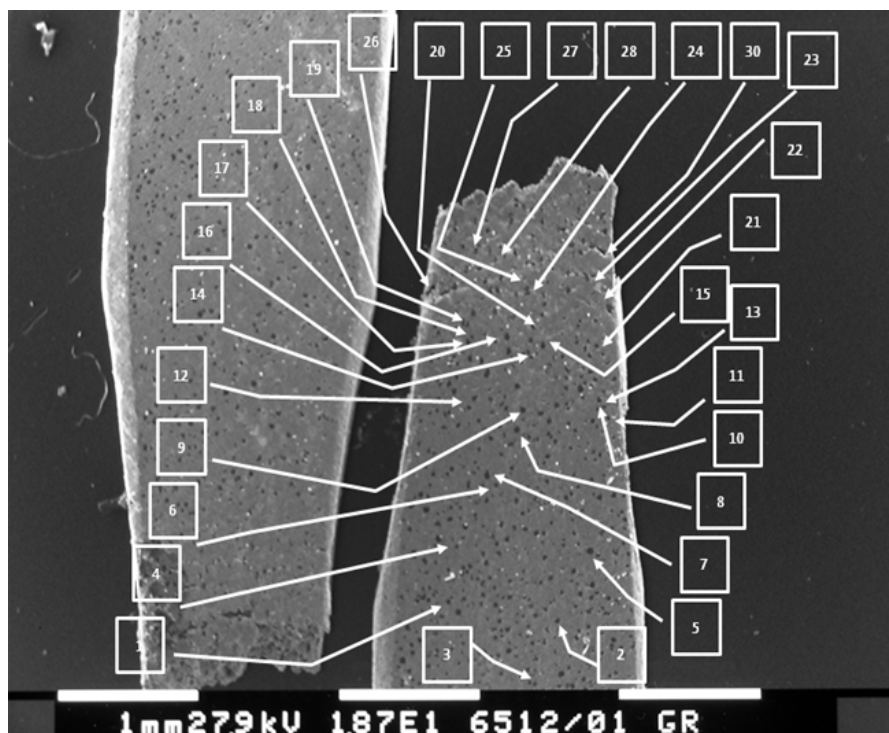


Figura 10: Posizione delle osservazioni al SEM.



Il campo di sollecitazione equivalente secondo Von Mises relativo all'istante immediatamente precedente alla rottura è riportato nella Fig. 11. In essa è evidente come i punti che si trovano nella parte prossima all'intaglio sono caratterizzati da uno sforzo unitario equivalente di Von Mises inferiore rispetto a quelli che si trovano nell'intaglio. I valori puntuali, calcolati in corrispondenza dei punti di osservazioni di Fig. 10 sono stati riportati sulla curva di trazione rilevata su un provino uniaassiale (Fig. 12). Tali punti sono stati numerati in ordine crescente in base alla numerazione come riportato sulla curva di Fig. 12.



Figura 11: Campo delle tensioni di Von Mises [MPa] prima della rottura.

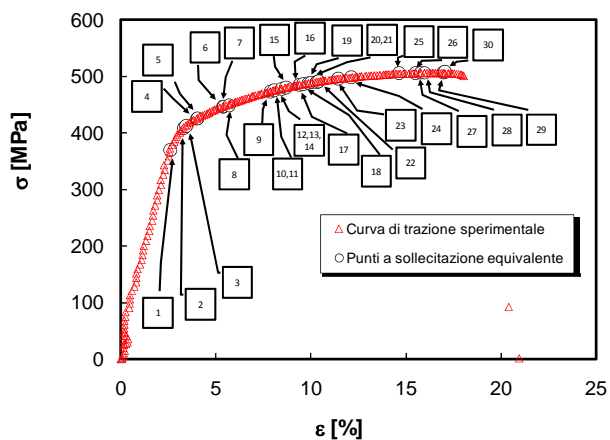


Figura 12: Relazioni σ - ϵ della ghisa sferoidale ferritica: confronto tra la prova uniaassiale ed i valori di tensione equivalente di Von Mises calcolati sul provino intagliato.

La presenza di un danneggiamento irreversibile è evidente per sollecitazioni anche di poco superiori al limite elastico, con il contemporaneo innesco di cricche all'interno dello sferoide di grafite e la formazione di linee di scorrimento nella matrice metallica (Fig.13, osservazione SEM del punto 5 di Fig. 10). Si può osservare che le linee di scorrimento si generano a partire dal "equatore" del nodulo (come peraltro già evidenziato in bibliografia [4]), e la cricca si propaga all'interno dello sferoide, nella zona equatoriale, non evidenziandosi il distacco matrice-nodulo.

Incrementando la sollecitazione. Si può osservare che il danneggiamento all'interno dello sferoide aumenta, con le cricche sempre più evidenti. Nel caso dello sferoide nel punto 7 di Fig.10 e 12, il danneggiamento è solo in parte costituito dal distacco della matrice metallica dallo sferoide (la parte in alto a destra, Fig. 14), mentre il danneggiamento principale prevede una serie di cricche che propagano nello sferoide circolarmente (meccanismo "a cipolla"). Le linee di scorrimento nella matrice metallica sono leggermente più evidenti rispetto al punto 5.

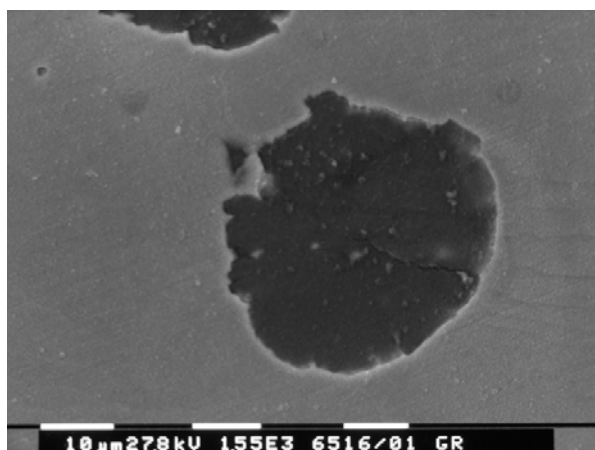


Figura 13: Danneggiamento in corrispondenza del punto 5 di Fig. 10 e 12.

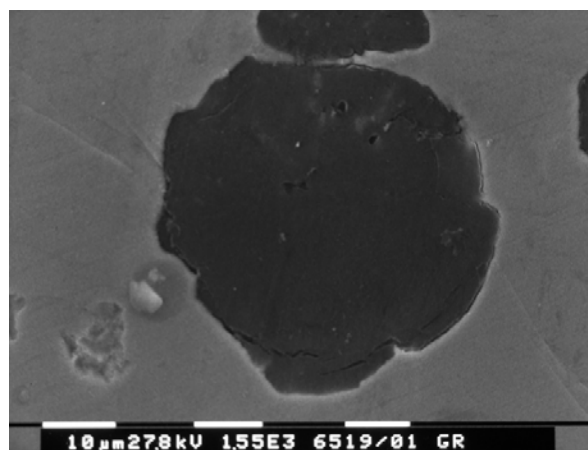


Figura 14: Danneggiamento in corrispondenza del punto 7 di Fig. 10 e 12.

Incrementando la sollecitazione, si può osservare una evidente degenerazione dei noduli di grafite, con una ulteriore propagazione delle cricche ed una ulteriore apertura (Fig. 15). Le linee di scorrimento si dipartono prevalentemente a partire dalla “zona equatoriale” dello sferoide. Ulteriori, minimi incrementi della sollecitazione comportano un evidente incremento della evidenza delle linee di scorrimento e la possibile formazione di cricche nella matrice nel caso in cui siano roesenti noduli vicini, unendo in tal modo cricche nate all’interno dei noduli medesimi (Fig. 16).

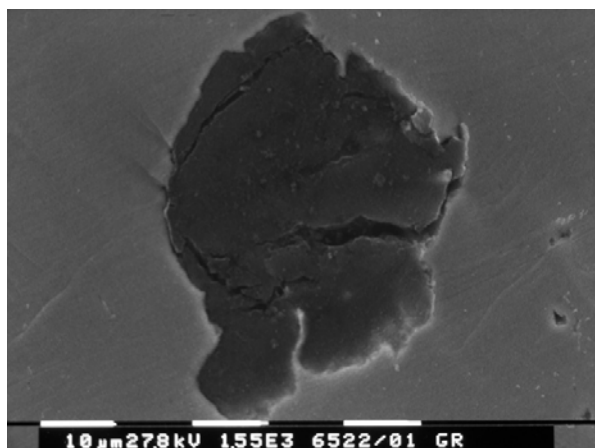


Figura 15: Danneggiamento in corrispondenza del punto 10 di Fig. 10 e 12.

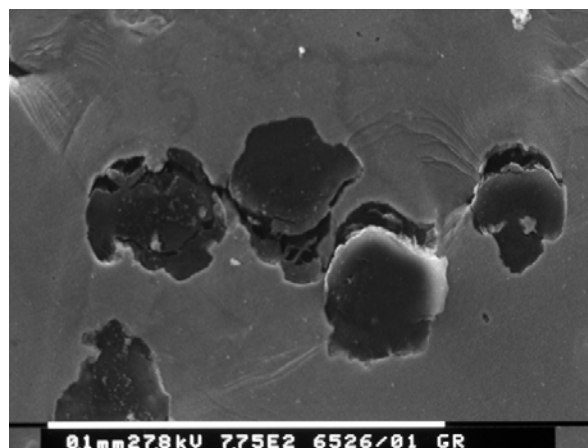


Figura 16: Danneggiamento in corrispondenza del punto 14 di Fig. 10 e 12.

Ulteriori incrementi della sollecitazione comportano contemporaneamente una sempre maggiore evidenza delle linee di scorrimento nella matrice (Fig. 17) ed un danneggiamento crescente dei noduli di grafite, con il meccanismo di danneggiamento “a cipolla” ormai completamente sviluppato e, talvolta, la presenza di cricche centrali all’interno dello sferoide completamente passanti (Fig. 18).

Procedendo con l’incremento della sollecitazione si può osservare l’incremento del danneggiamento duttile della matrice, con linee di scorrimento sempre più evidenti (Fig. 19), che si dipartono dallo sferoide non solo in corrispondenza della “zona equatoriale”, ma anche in prossimità dei “poli”. La disgregazione dello sferoide è ancora più evidente, con il meccanismo “a cipolla” che comporta l’innesco di un numero molto elevato di microcricche e con cricche radiali che incrementano ulteriormente la loro ampiezza. Per queste sollecitazioni, nel caso di uno sferoide di grafite isolato, non si verifica una propagazione della cricca dallo sferoide alla matrice metallica.

Avvicinandosi alla sollecitazione di rottura, si possono innescare sulla superficie laterale del provino, in prossimità della sezione minima dell’intaglio, delle cricche della lunghezza di qualche centinaio di micron (Fig. 20). Per tali valori di sollecitazione, ormai prossimi alla rottura, il danneggiamento in prossimità della superficie di frattura riguarda sia gli



sferoidi di grafite, ormai completamente disgregati, sia la matrice, con la propagazione di microcricche che si innescano in corrispondenza dell'interfaccia sferoide-matrice (Fig. 21).

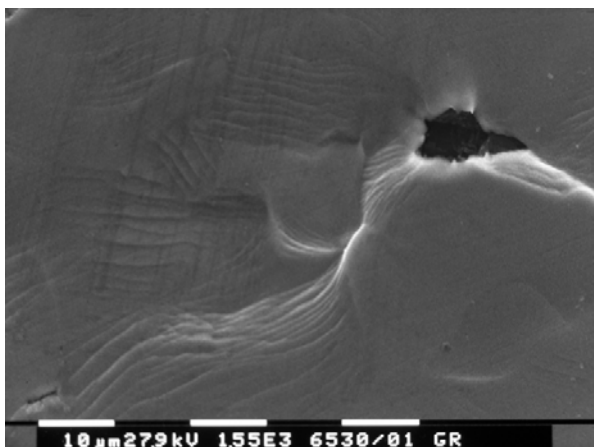


Figura 17: Danneggiamento in corrispondenza del punto 18 di Fig. 10 e 12.

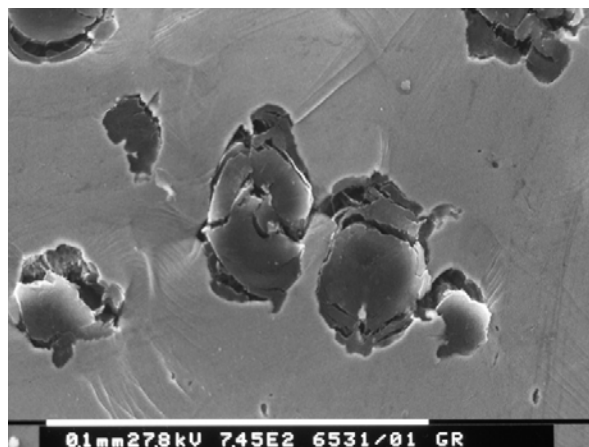


Figura 18: Danneggiamento in corrispondenza del punto 19 di Fig. 10 e 12.

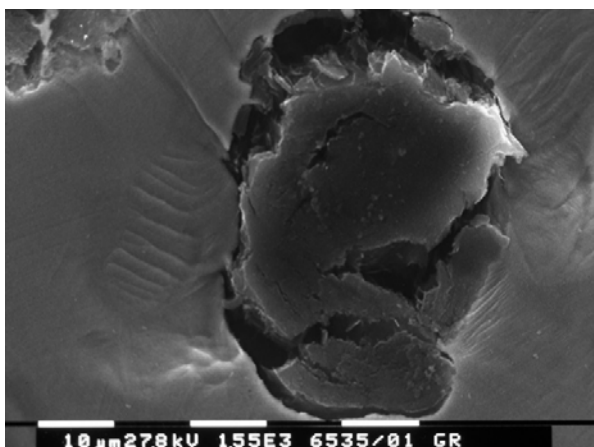


Figura 19: Danneggiamento in corrispondenza del punto 23 di Fig. 10 e 12.

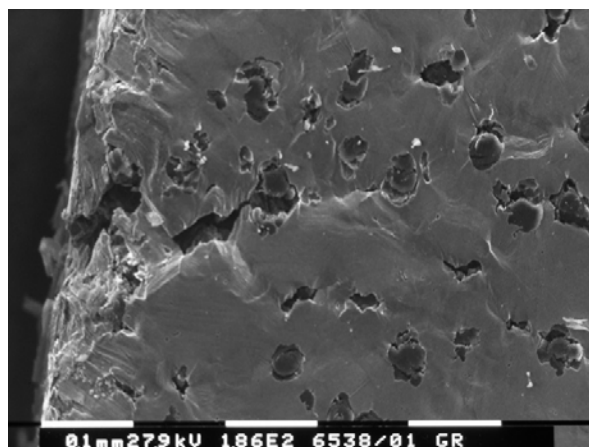


Figura 20: Danneggiamento in corrispondenza del punto 26 di Fig. 10 e 12.

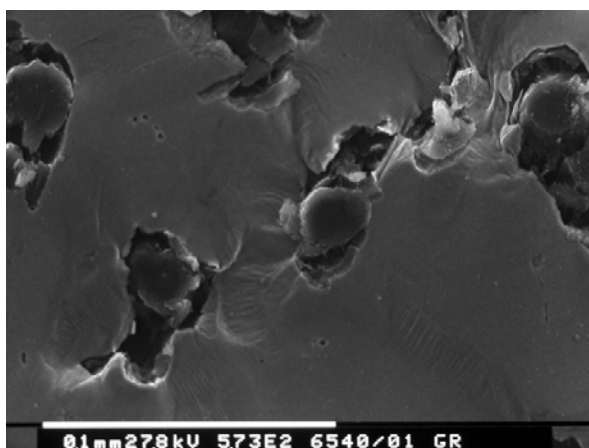


Figura 21: Danneggiamento in corrispondenza del punto 28 di Fig. 10 e 12.



Come è possibile rilevare da tutte le osservazioni effettuate per tutte le condizioni di sollecitazioni, il “puro” distacco dello sferoide dalla matrice ferritica non è stato mai osservato. Il *debonding* grafite-matrice può costituire talora uno dei possibili meccanismi che possono agire parzialmente sul singolo sferoide, ma sicuramente non costituisce né l'unico né il principale meccanismo di danneggiamento.

CONCLUSIONI

Ad oggi, l'identificazione dei micromeccanismi di danneggiamento nelle ghise sferoidali non è ancora completa, solitamente identificando nel *debonding* matrice – nodulo l'unico meccanismo di danneggiamento efficace.

In questo lavoro sono stati analizzati i meccanismi di danneggiamento in una ghisa sferoidale con matrice completamente ferritica, effettuando delle osservazioni al microscopio elettronico a scansione durante una prova di trazione effettuata su un provino intagliato ed al termine della medesima. Sulla base dei risultati sperimentali, è possibile riassumere le seguenti conclusioni:

- nel caso delle ghise ferritiche, il distacco matrice-sferoide si verifica raramente e, quando ciò avviene, può interessare solo porzioni limitate della superficie di interfaccia;
- la formazione di cricche nei noduli di grafite è contemporanea alla formazione di linee di scorrimento nella matrice metallica;
- i principali meccanismi di danneggiamento degli sferoidi consistono nella formazione di cricche circolari (meccanismo “a cipolla”) e di cricche radiali, talora innescate nel centro dello sferoide; per qualunque condizione di sollecitazione, non sono stati osservati noduli perfettamente distaccati dalla matrice, senza cricche interne;
- il danneggiamento degli sferoidi progredisce con la sollecitazione; nel caso di sferoidi ravvicinati, le cricche interne agli sferoidi possono propagare nella matrice, unendosi;
- per sollecitazioni molto elevate, si possono innescare cricche superficiali; una di queste cricche evolve portando il provino a rottura.

BIBLIOGRAFIA

- [1] R.G. Ward, *An Introduction to the Physical Chemistry of Iron and Steel Making*, Arnold, London (1962).
- [2] C. Labrecque, M. Gagne, *Canadian Metallurgical Quarterly*, 37 (1998) 343.
- [3] F. Iacoviello, O. Di Bartolomeo, V. Di Cocco, V. Piacente, *Mater. Science and Engineering A*, 478 (2008) 181.
- [4] M. J. Dong, C. Prioul, D. François, *Metall. and Mater. Trans. A*, 28A (1997) 2245.
- [5] C. Guillermer-Neel, X. Feugas, M. Clavel, *Metall. and Mater. Trans. A*, 31A (2000) 3063.
- [6] J.H. Liu, X.Y. Hao, G. L. Li, G. Sh. Liu, *Mater. Letters*, 56 (2002) 748.
- [7] R. C. Voigt, L. M. Eldoky, H.S. Chiou, *AFS Trans.*, 94 (1986) 645.
- [8] L. Eldoky, R.C. Voigt, *AFS Trans.*, 86-104 (1986) 631.
- [9] C. Berdin, M.J. Dong, C. Prioul, *Engineering Fracture Mechanics*, 68 (2001) 1107.
- [10] K.S. Zhang, J.B. Bai, D. François, *Int. J. of Solids and Structures*, 36 (1999) 3407.
- [11] C. Guillermer-Neel, X. Feugas, M. Clavel, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 31A (2000) 3063.
- [12] V. Di Cocco, F. Iacoviello, *Ferritic Ductile Cast Iron Damaging Characterization*, Atti del Convegno Crack Path 2009, Vicenza, Italia (2009, in stampa).