

# Una banca dati sul comportamento a fatica delle ghise sferoidali austemperate

E. Gasparini, G. Meneghetti

Vengono descritte la struttura e le modalità di funzionamento principali di un database per la raccolta di dati sulle caratteristiche meccaniche, in particolare di resistenza a fatica, delle ghise sferoidali austemperate. L'analisi dei dati archiviati ha consentito di evidenziare alcune correlazioni tra le caratteristiche meccaniche statiche (tensione di rottura, snervamento e allungamento percentuale dopo rottura) e a fatica (resistenza a fatica ad elevato numero di cicli, pendenza della curva di Woehler) e le caratteristiche microstrutturali (principalmente contenuto di austenite residua e diametro dei noduli di grafite), consentendo di trarre utili indicazioni per la progettazione meccanica.

**Parole chiave:** ghise sferoidali austemperate, database, fatica, sensibilità all'intaglio

## INTRODUZIONE

Le caratteristiche meccaniche delle ghise grigie sono influenzate da molteplici fattori microstrutturali quali la morfologia della grafite, il tipo di matrice, la presenza di difetti e le loro dimensioni, lo stato superficiale. La caratteristica peculiare delle ghise sferoidali è presentare la grafite anziché sotto forma di lamelle interconnesse, come nella ghisa lamellare, in noduli a forma di sferoidi in seno ad una matrice metallica che può essere ferritica, perlitica o mista (ferritico-perlitica) a seconda della composizione chimica della ghisa e delle velocità di raffreddamento durante la solidificazione e il raffreddamento. Fra tutti i tipi di ghisa quelle sferoidali possiedono la tenacità a frattura più elevata a temperatura ambiente, a causa della minore concentrazione di tensione che si ha in prossimità della grafite sotto forma di sferoidi in confronto a quella sotto forma di lamelle [1,2]. Dunque le ghise sferoidali possiedono caratteristiche di elevata resistenza unite ad una buona tenacità, che ne permettono l'impiego in applicazioni strutturali, specie in ambito automobilistico e costituiscono una valida ed economica alternativa all'acciaio, forgiato o fuso, per componenti quali ad esempio alberi, bielle motore, ruote dentate [3]. Il trattamento di austempering esalta le caratteristiche di resistenza e tenacità delle ghise sferoidali a causa della particolare microstruttura che ne deriva, costituita da ferrite aciculare e austenite sovrassatura in carbonio (ausferrite). Il trattamento di austempering consiste essenzialmente in due fasi: austenitizzazione a circa 900°C per un tempo di 2 ore e austempering per immersione in un bagno di sali fusi ad una temperatura variabile fra 300°C e 400°C.

In letteratura è possibile rintracciare una molteplicità di dati relativi a prove di fatica sulle ghise sferoidali, sia convenzionali che austemperate [4-32]. Questi dati, però, vengono forniti dai vari autori senza che vi sia uniformità e completezza nella presentazione, soprattutto per quanto riguarda la correlazione esistente fra microstruttura (dipendente dalla composizione chimica, dalle dimensioni e dai parametri tecnologici di trattamento termico) e caratteristiche meccaniche. Pertanto, non sempre l'analisi dei dati sperimentali e il confronto con i dati forniti da altri autori, può avvenire con semplicità ed immediatezza. Per questo motivo è stato realizzato un database [33] in cui archiviare e gestire i dati di prove di fatica reperiti in letteratura, di cui viene descritta la logica

con cui sono state organizzate le informazioni relative alle caratteristiche meccaniche e microstrutturali del materiale e le modalità di funzionamento essenziali. Per la realizzazione del database si è scelto di utilizzare il programma ACCESS® '97 della Microsoft, ed in esso sono attualmente archiviati i dati relativi a ottantadue serie di prove a fatica. Di queste, 21 serie si riferiscono alle ghise sferoidali convenzionali (GS) e 61 si riferiscono alle ghise sferoidali austemperate (GSA). Il database risulta costituito principalmente da sette tabelle relazionali legate a sette schede per l'archiviazione dei dati di fatica e da tre finestre che, fungendo da interfaccia tra software ed utente, permettono di immettere (finestra di INPUT), di visualizzare (finestra di OUTPUT) e di ricercare (finestra SEARCH) tutte le informazioni contenute nella banca dati.

Le sette schede utilizzate per la memorizzazione dei dati sono riportate in fig. 1. Una scheda riassuntiva, denominata "Display Data", viene utilizzata per la visualizzazione di tutte le informazioni archiviate. Nella stessa finestra sono disponibili le funzioni di Export, Delete, Print che consentono, rispettivamente, di esportare i dati in un foglio di calcolo EXCEL o come file di input per l'analisi statistica dei dati, di cancellarli o di stampare i dati visualizzati. Pertanto, per immettere una nuova serie di dati le schede da prendere in considerazione sono, in sequenza:

- "Reference" per le informazioni relative al tipo di ghisa e al riferimento bibliografico;
- "Material" per le informazioni sulla composizione chimica, sulla microstruttura e sulla quantità e morfologia dei noduli di grafite;

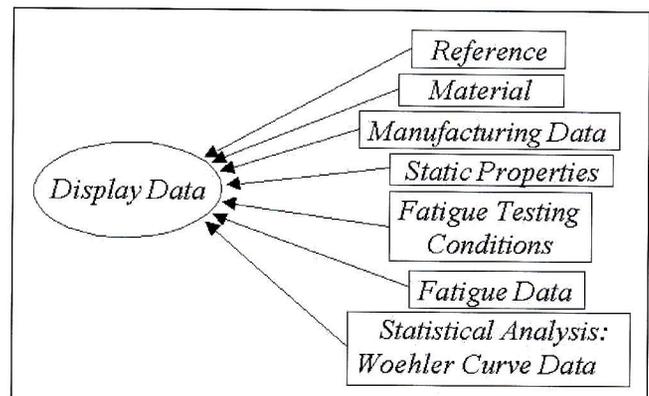


Fig. 1: Schede utilizzate per l'immissione dei dati nel database.

Fig. 1: Data collected in the database.

E. Gasparini, G. Meneghetti

Dipartimento di Ingegneria Meccanica - Università di Padova

- "Manufacturing Data" per le informazioni tecnologiche relative alla temperatura e alla durata del trattamento termico di austempering;
- "Static Properties" per le caratteristiche meccaniche statiche del materiale;
- "Fatigue Testing Conditions" per le informazioni relative alle condizioni di prova (macchina di prova, tipo di sollecitazione applicata, temperatura, frequenza di applicazione del carico, rapporto di sollecitazione, geometria del provino, stato superficiale del provino);
- "Fatigue Data" per l'immissione dei dati sperimentali relativi ad una serie di prove a fatica (ampiezza di sollecitazione applicata - numero di cicli a rottura);
- "Statistical Analysis: Woehler Curve Data" per i risultati dell'analisi statistica dei dati a fatica (pendenza della curva di Woehler, valore della resistenza a fatica  $\sigma_{A,50\%}$  per una probabilità di sopravvivenza del 50% ad un numero di cicli di riferimento  $N_A$ , parametro  $T_\sigma = \sigma_{A,10\%} / \sigma_{A,90\%}$ , che quantifica la dispersione dei risultati sperimentali, coefficiente di correlazione dei dati sperimentali).

La figura 2 presenta sinteticamente la struttura del database ed evidenzia che i dati archiviati mediante la finestra di INPUT vengono visualizzati sempre nella stessa scheda "Display Data" qualunque sia la procedura seguita per visualizzare i dati. Infatti è possibile visualizzare tutti i dati archiviati nel database e ordinarli secondo la designazione unificata (opzione "Material Index") o raggrupparli per autore (opzione "Author Index"); oppure è possibile utilizzare la finestra SEARCH, in cui vengono visualizzati i soli dati che soddisfano i criteri di ricerca impostati dall'utente relativamente al tipo di microstruttura, alle caratteristiche statiche, al tipo di prova a fatica e alla geometria del provino. Queste caratteristiche della maschera di ricerca del database insieme alla possibilità di esportare i dati visualizzati come foglio di calcolo Excel o come file di input per l'analisi statistica dei dati di prove a fatica, sono state sfruttate per rianalizzare i dati archiviati e quindi evidenziare le correlazioni esistenti fra microstruttura e proprietà statiche e a fatica delle ghise sferoidali austemperate.

I risultati ottenuti si ritengono utili linee guida per la progettazione meccanica.

Diversi autori [5,9,10,14] evidenziano che al crescere del contenuto di ferrite aciculare in rapporto al contenuto di austenite residua aumentano le caratteristiche di resistenza statica (la tensione di rottura  $\sigma_R$ , la tensione di snervamento  $\sigma_{p0,2}$  e la durezza), ma al tempo stesso diminuiscono la duttilità e la tenacità delle GSA. Ciò è dovuto al fatto che la ferrite aciculare è la fase fragile della microstruttura e conferisce al materiale elevata resistenza, mentre l'austenite residua ne aumenta la duttilità e la tenacità a frattura. La figura 3 riporta la tensione di rottura in funzione del contenuto di austenite residua e del diametro medio dei noduli di grafite. Nella figura sono stati raggruppati i punti con gli stessi parametri di trattamento di austempering evidenziando che all'aumentare della temperatura aumenta tendenzialmente il contenuto di austenite residua e diminuisce la tensione di rottura.

La fig. 3 evidenzia inoltre che la diminuzione della tensione di rottura all'aumentare delle dimensioni dei noduli è sensibile se la temperatura di austempering è di 300°C, mentre è praticamente assente, almeno in base ai dati disponibili, se la temperatura di trattamento è più elevata, attorno a 350°C÷360°C. Il fatto che per basse temperature di austempering, e quindi minore contenuto di austenite residua, il materiale sia più sensibile all'effetto nocivo della presenza dei noduli ed eventualmente di porosità (in genere associati ad un aumento delle dimensioni dei getti), è già stato evidenziato in letteratura [1,4,14]. L'influenza della dimensione dei noduli invece è molto superiore nel caso in cui si analizzi il comportamento a fatica, come si vedrà più avanti. La diminuzione della duttilità al diminuire del contenuto di austenite residua è indicata anche dall'andamento dell'allungamento percentuale dopo rottura riportato in fig. 4. I dati si riferiscono ad una temperatura di austempering compresa fra 300 e 360 °C con un tempo di trattamento compreso fra 120 e 180 minuti. I dati disponibili sembrano indicare inoltre che allungamenti a rottura superiori si possono ottenere con noduli di grafite di dimensioni relativamente piccole, come dimostrano i punti anneriti corrispondenti al minimo diametro dei noduli considerato.

Infine la figura 5 mostra che il rapporto tra la tensione di

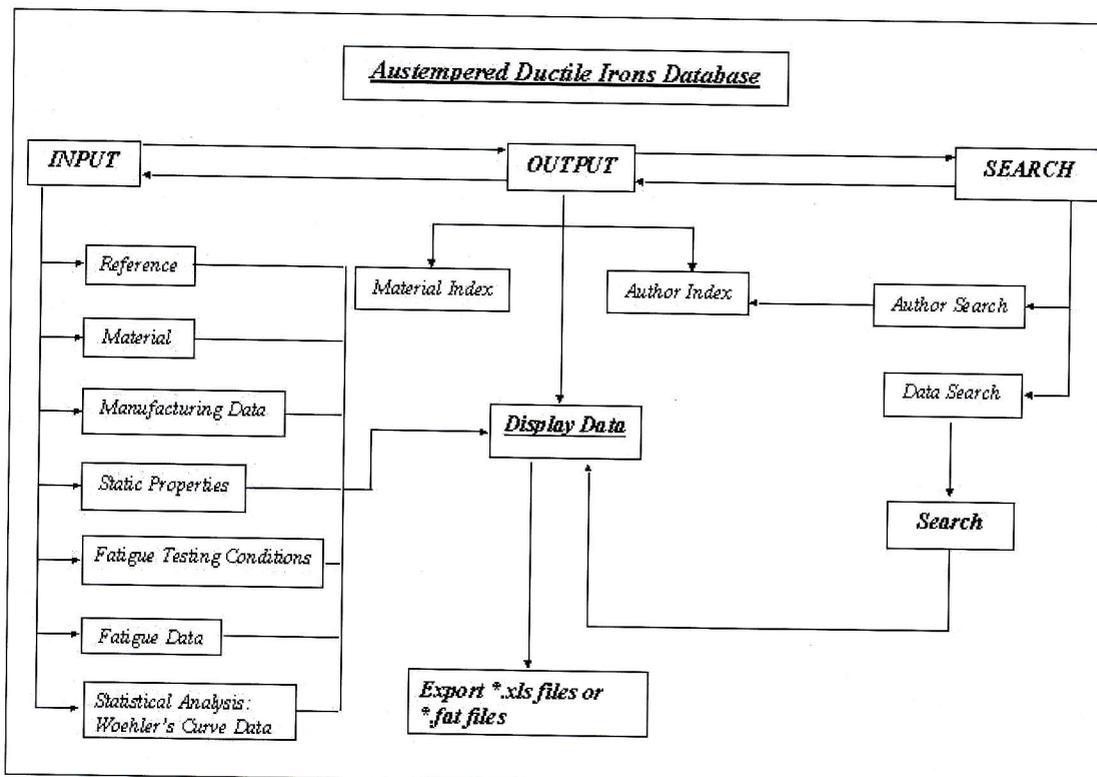


Fig. 2: Struttura del database implementato.

Fig. 2: Structure of the implemented database.

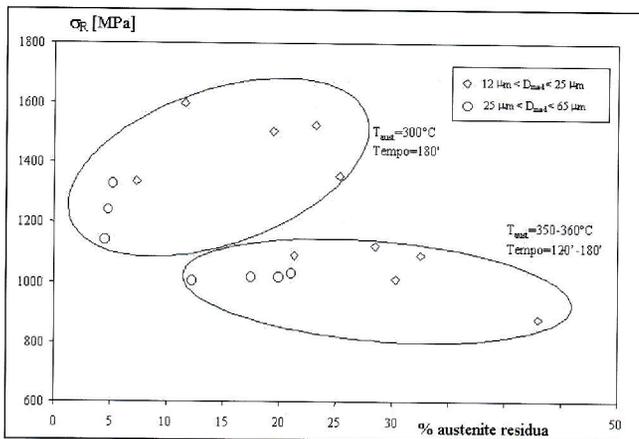


Fig. 3: Andamento della tensione di rottura in funzione del contenuto percentuale di austenite residua e del diametro medio dei noduli ( $D_{med}$ ).

Fig. 3: Tensile strength versus austenite content and mean size of the graphite nodules ( $D_{med}$ ).

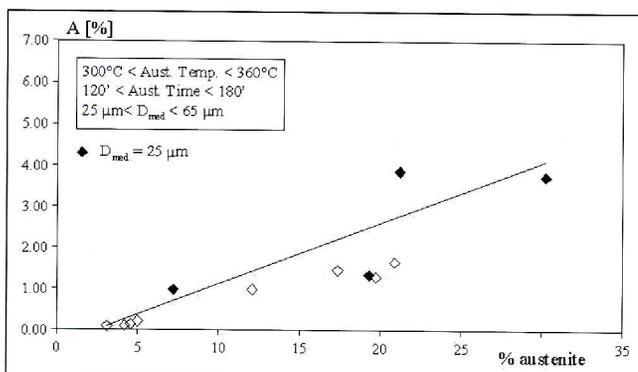


Fig. 4: Allungamento percentuale dopo rottura in funzione del contenuto di austenite residua e del diametro medio dei noduli.

Fig. 4: % elongation after failure versus austenite content and mean size of the graphite nodules.

snervamento e la tensione di rottura tende a valori prossimi ad uno quanto più la matrice è fragile. L'analisi dei pochi dati archiviati nel database per cui è riportata la dimensione dei noduli sembra inoltre indicare che la diminuzione della dimensione dei noduli, a parità di altre condizioni, fa diminuire il rapporto tra tensione di snervamento e tensione di rottura.

### RESISTENZA A FATICA

La quasi totalità dei risultati di prove di fatica archiviate nel database si riferiscono a prove a flessione rotante su provini lisci e, anche se in numero molto minore, su provini intagliati con coefficiente teorico di concentrazione delle sollecitazioni variabile tra 1.44 e 2.64 e raggi di fondo intaglio variabili tra 0.3mm e 3mm. Le curve di fatica per le GSA riportate da diverse fonti [4,6,7,9,10,12] evidenziano che il ginocchio della curva di Woehler in corrispondenza del limite di fatica si trova ad un numero di cicli  $N_G$  in genere attorno a  $10^6$ . Tale comportamento risulta simile a quello di provini intagliati in acciaio, poiché le ghise sono materiali intrinsecamente intagliati per la presenza dei noduli di grafite o di porosità. In letteratura tuttavia non è stata ancora evidenziata una relazione analitica tra il valore di  $N_G$  e il valore del diametro medio dei noduli, anche per l'insufficiente numero di valori di  $N_G$  disponibili. Pertanto i dati archiviati nel data-

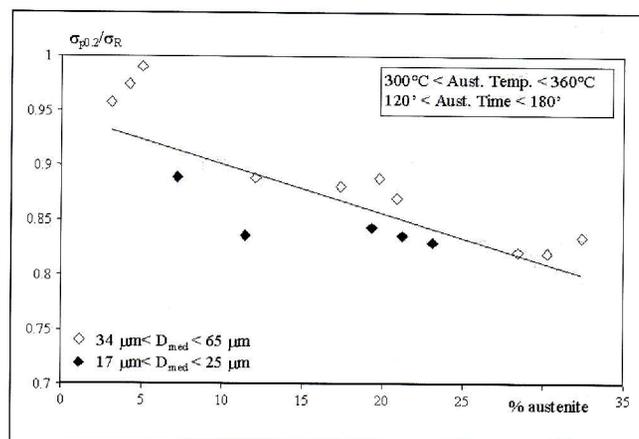


Fig. 5: Rapporto fra tensione di snervamento e tensione di rottura in funzione del contenuto di austenite residua.

Fig. 5: Ratio between yield strength and tensile strength versus austenite content.

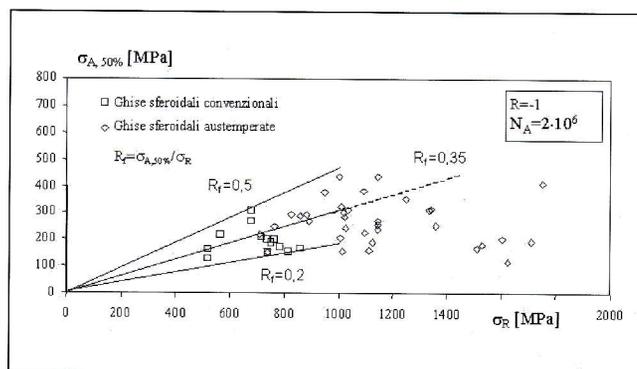


Fig. 6: Resistenza a fatica in funzione della tensione di rottura per ghise sferoidali convenzionali e austemperate (provini lisci).

Fig. 6: Fatigue strength versus tensile strength for conventional cast irons and ADIs (smooth specimens).

base sono stati elaborati assumendo come valore caratteristico della ampiezza di sollecitazione  $\sigma_a = (\sigma_{max} - \sigma_{min})/2$  il valore  $\sigma_A$  a  $N_A = 2 \cdot 10^6$  cicli ed al 50% di probabilità di sopravvivenza. L'effetto d'intaglio introdotto dai noduli di grafite penalizza la resistenza a fatica delle ghise sferoidali austemperate, specie per bassi contenuti di austenite residua, cioè elevati carichi di rottura. La matrice risulta, infatti, più fragile e dunque più sensibile agli intagli e ai difetti: per questo motivo su provini lisci al di sopra di una certa tensione di rottura la resistenza a fatica non aumenta più, come evidenziato in fig. 6. Il comportamento delle ghise sferoidali è pertanto simile a quello di provini con intagli severi in acciaio. L'effetto positivo sulla resistenza a fatica dovuto al rafforzamento della matrice è sovrastato, oltre un certo valore della tensione di rottura, dalla maggiore sensibilità all'intaglio dovuto ai noduli di grafite (o a porosità).

Questo fatto è evidenziato dalla fig. 7 che riporta la variazione della resistenza a fatica limitatamente alle ghise sferoidali austemperate per cui gli Autori fornivano il diametro medio dei noduli. Si nota che la resistenza a fatica diminuisce da circa 370 MPa a 170÷200 MPa quando la tensione di rottura aumenta da 1100 MPa a 1500÷1600 MPa. Inoltre è evidente l'effetto di penalizzazione che ha l'aumento della dimensione dei noduli di grafite.

La figura 8 confronta invece il comportamento a fatica delle ghise sferoidali convenzionali e di quelle austemperate in termini di rapporto di fatica. Sebbene la resistenza a fatica

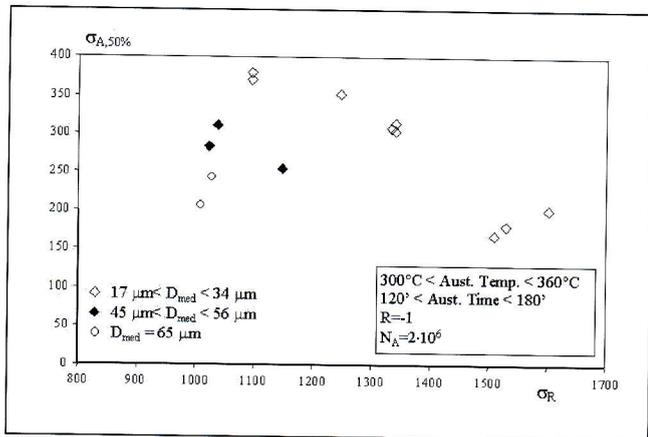


Fig. 7: Resistenza a fatica in funzione della tensione di rottura e del diametro medio dei noduli (provini lisci) per le ghise sferoidali austemperate.

Fig. 7: Fatigue strength versus tensile strength and mean size of the graphite nodules (smooth specimens) for ADIs.

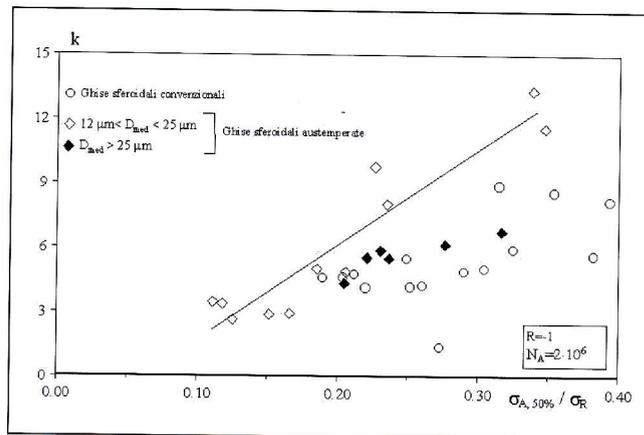


Fig. 9: Pendenza della curva di Woehler in funzione del rapporto di fatica per ghise sferoidali convenzionali e austemperate (provini lisci).

Fig. 9: Inverse slope of the Woehler curve versus fatigue ratio for conventional cast irons and ADIs (smooth specimens).

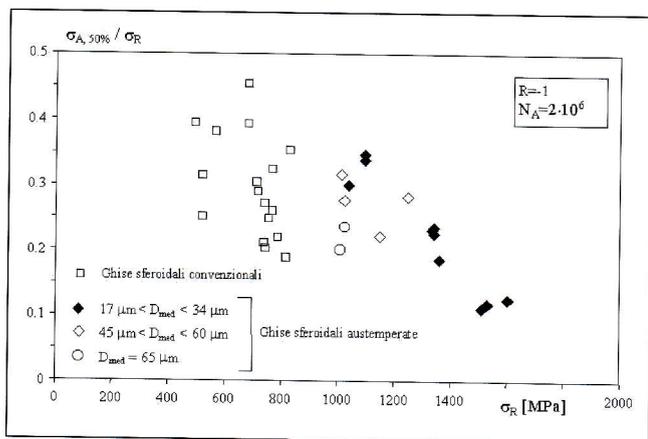


Fig. 8: Rapporto di fatica per ghise sferoidali convenzionali e austemperate (provini lisci)

Fig. 8: Fatigue ratio for conventional cast irons and ADIs (smooth specimens).

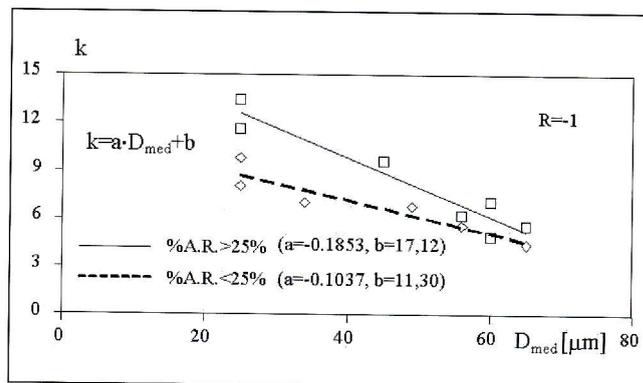


Fig. 10: Andamento della pendenza della curva di Woehler in funzione del diametro medio dei noduli per differenti contenuti di austenite residua A.R. (materiale liscio).

Fig. 10: Inverse slope of the Woehler curve versus mean size of the graphite nodules (smooth specimens) for different austenite contents.

delle ghise convenzionali sia tendenzialmente inferiore in termini assoluti rispetto a quella delle ghise austemperate (cfr fig. 6), il rapporto di fatica delle prime è mediamente superiore, a dimostrazione ancora del fatto che la maggiore resistenza statica ottenuta con il trattamento di austempering comporta una maggiore sensibilità all'intaglio dovuto ai noduli o alle porosità. Per quanto riguarda l'influenza della dimensione dei noduli sulla resistenza a fatica delle ghise convenzionali, in letteratura non si trovano dati sufficienti per quantificarla.

La variazione del rapporto di fatica rispetto alla tensione di rottura ha una diretta influenza sulla pendenza della curva di Woehler (esprimibile anche nel caso delle ghise con la classica espressione  $\sigma_a^k \cdot N = \text{cost.}$ ), evidenziata in fig. 9, in cui sono confrontate le ghise convenzionali e quelle austemperate. Considerando le ghise austemperate con le più piccole dimensioni dei noduli di grafite, si vede che la pendenza della curva di Woehler varia da circa 3, quando il rapporto di fatica si avvicina a 0.1, a circa 12 quando il rapporto di fatica si avvicina a 0.35. La prima condizione si riferisce a ghise con le massime caratteristiche statiche (cfr fig. 8) e la relativa pendenza della curva di fatica è quella tipica degli acciai con intagli severi, mentre la seconda condizione si realizza per ghise aventi una matrice più duttile. Per ghise sferoidali convenzionali invece la pendenza è generalmente inferiore.

Analogo effetto ha l'aumento della dimensione media dei noduli per le ghise austemperate.

La figura 10 infine analizza la variazione della pendenza della curva di Woehler non in funzione di caratteristiche meccaniche, ma di parametri microstrutturali, cioè della dimensione dei noduli di grafite e del contenuto di austenite residua. Poiché la sensibilità ai difetti a parità di dimensione dei noduli è maggiore se la matrice è più fragile, la pendenza della curva di fatica è in questo caso inferiore.

### SENSIBILITÀ ALL'INTAGLIO

Diversi autori [7,8,11,12,19] concordano nell'affermare che le ghise sferoidali austemperate mostrano una sensibilità all'intaglio inferiore a quella di un acciaio ad alta resistenza. La figura 11 riporta nel diagramma dell'indice di sensibilità all'intaglio fornito dal Peterson [35] i valori ricavati dalla letteratura e riportati in fig. 12 per ghise sferoidali austemperate aventi tensione di rottura compresa fra 1000 e 1350 MPa e intagli circolarizionali su provini cilindrici con raggi di fondo intaglio variabili fra 0.6 e 3 mm.

Le figure 11 e 12 evidenziano che l'indice di sensibilità all'intaglio aumenta all'aumentare della tensione di rottura e che per valori prossimi a 1350 MPa, q risulta confrontabile

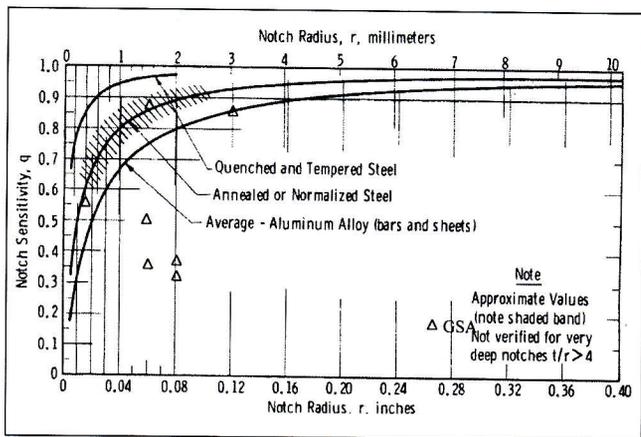


Fig. 11: Confronto dell'indice di sensibilità all'intaglio delle GSA con quello degli acciai e delle leghe leggere.

Fig. 11: Comparison of the notch sensitivity index for ADIs, steels and light alloys.

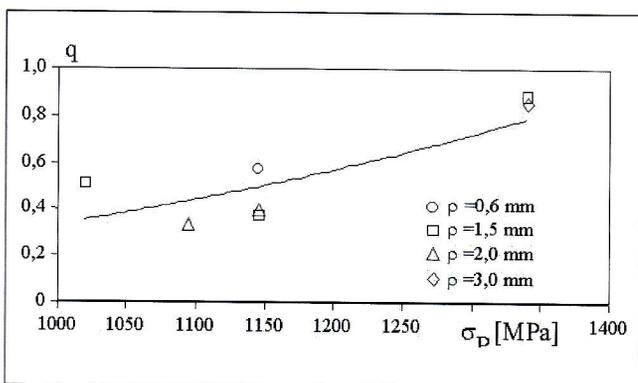


Fig. 12: Indice di sensibilità all'intaglio q delle GSA in funzione della tensione di rottura (ricavato da prove di flessione rotante su provini con intagli aventi  $K_t$  compreso fra 1.44 e 2.64).

Fig. 12: Notch sensitivity index for ADIs versus the tensile strength (from rotating bending fatigue tests on notched specimens characterised by  $K_t$  between 1.44 and 2.64).

	C	m	$\Delta K_{th} [MPa \cdot m^{0.5}]$	$\Delta K_c [MPa \cdot m^{0.5}]$
ASTM A533 Steel	$8 \cdot 10^{-11}$	3	8	100
HSLA Steel	$3 \cdot 10^{-13}$	3,1	4,5	36
AISI 304 Steel	$3,7 \cdot 10^{-12}$	2,4	12	100
7075 T6 Al-Alloy	$5 \cdot 10^{-10}$	3,3	3,2	30
GS convenzionale	$9 \cdot 10^{-13}$	4,1	5	37
GSA EN-GJS-800-8	$8 \cdot 10^{-13}$	3,4	8,1	57

Tab. 1: Costanti della curva di Paris per alcuni materiali da costruzione per rapporto di sollecitazione  $R=0.1$  [35].

Tab. 1: characteristic parameters of the Paris curve for different metallic materials (load ratio  $R=0.1$  [35]).

con quello degli acciai normalizzati. Viceversa per una ghisa con carichi di rottura più bassi (tra 1000 e 1150 MPa) i pochi dati disponibili mostrano chiaramente, pur con un'ampia dispersione dei risultati, la netta diminuzione dell'indice di sensibilità all'intaglio.

La figura 13 riporta infine la pendenza della curva di Woehler per provini intagliati in funzione del rapporto di fatica ed evidenzia che il campo di valori è lo stesso trovato per i pro-

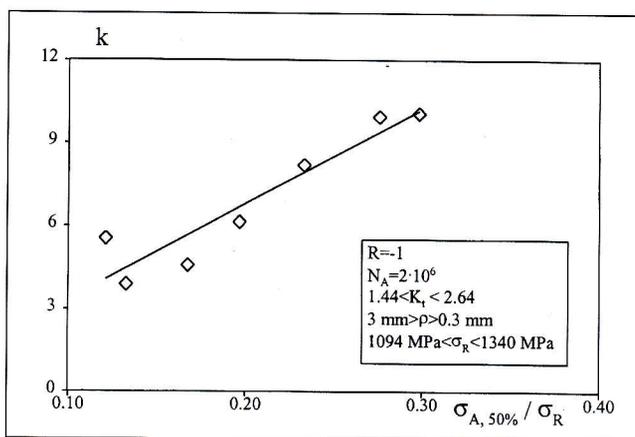


Fig. 13: Pendenza della curva di Woehler per provini intagliati in ghisa sferoidale austemperata in funzione del rapporto di fatica.

Fig. 13: Inverse slope of the Woehler curve for notched specimens in austempered ductile iron versus fatigue ratio.

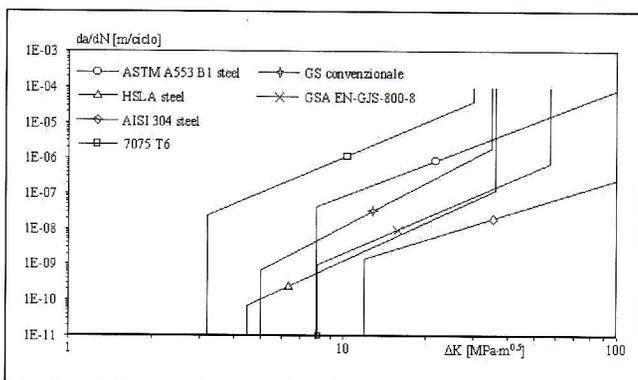


Fig. 14: Curve di Paris delle ghise sferoidali confrontato con quello di altri materiali (rapporto di ciclo  $R=0.1$ ) [35].

Fig. 14: Paris curves for ductile irons compared with those for other metallic materials (load ratio  $R=0.1$ ) [35].

vini lisci e riportato in fig. 9. Il rapporto di fatica, che normalmente in letteratura è definito per provini lisci, è stato utilizzato in fig. 13 con riferimento a provini intagliati, come rapporto tra il valore caratteristico di resistenza a fatica del provino intagliato e la tensione di rottura del materiale. Da quanto detto in precedenza si può concludere che l'aumento delle caratteristiche statiche non porta in generale un miglioramento della resistenza a fatica del materiale. Occorre invece variane la geometria, in modo da ridurne l'effetto di concentrazione delle tensioni, oppure rafforzare la superficie con trattamenti quali la pallinatura, come ad esempio esaminato in [13].

### MECCANICA DELLA FRATTURA A FATICA

A conclusione della presentazione delle rianalisi dei dati archiviati nel database si vogliono fornire per completezza anche alcuni dati riguardanti la propagazione delle cricche a fatica nelle ghise sferoidali, tratti da una delle referenze esaminate [35]. La tabella 1 confronta le costanti relative alla curva di Paris ( $C$ ,  $m$ ,  $\Delta K_{th}$ ,  $\Delta K_c$ ) per alcuni materiali da costruzione, mentre la fig. 14 riporta gli andamenti schematici delle curve. Tali dati consentono di apprezzare l'elevato valore di soglia del fattore di intensificazione delle tensioni,

inferiore solamente a quello dell'acciaio inossidabile austenitico AISI 304, e il miglioramento delle caratteristiche meccaniche in tutte e tre le regioni della curva di Paris che il trattamento di austempering comporta rispetto alla ghisa sferoidale convenzionale. Per il momento non sono disponibili ulteriori dati per meglio sostanziare questo confronto al variare delle caratteristiche delle ghise considerate.

CONCLUSIONI

Le ghise sferoidali austemperate presentano un'eccellente combinazione di resistenza statica, a fatica e tenacità e le caratteristiche meccaniche possono essere variate in un range elevato scegliendo opportunamente i parametri di trattamento termico.

La tensione di rottura e di snervamento possono essere aumentate notevolmente (da circa 800 fino a 1600 MPa) diminuendo la temperatura di austempering da 360°C a circa 300°C, a spese della duttilità del materiale (l'allungamento dopo rottura può ridursi a valori di circa 1%). Infatti al diminuire della temperatura di trattamento diminuisce il contenuto di austenite residua, fase duttile nella matrice ed aumenta invece il contenuto di ferrite aciculare, fase più fragile. Tuttavia oltre 1000 MPa di tensione di rottura la resistenza a fatica cala abbastanza sensibilmente in termini assoluti e il rapporto di fatica diminuisce da circa 0.35 a 0.1. Ciò è dovuto al fatto che la ghisa è un materiale intrinsecamente intagliato dalla presenza dei noduli di grafite, il cui effetto penalizzante nel comportamento a fatica, a parità di dimensione, è tanto maggiore quanto più è fragile la matrice. Pertanto la temperatura di austempering che ottimizza la resistenza statica penalizza la resistenza a fatica e viceversa. Per questo motivo la pendenza della curva di Woehler dei provini lisci sollecitati con rapporto di ciclo  $R=-1$  varia notevolmente: se il materiale è molto resistente staticamente la pendenza è bassa, dell'ordine di 3÷4, mentre se il materiale è stato trattato per una elevata resistenza a fatica, la resistenza statica è relativamente bassa e la pendenza può arrivare a 10÷12. I pochi dati disponibili su provini intagliati indicano che la sensibilità all'intaglio delle ghise sferoidali austemperate cresce all'aumentare della tensione di rottura e diventa paragonabile a quella degli acciai normalizzati per carichi di rottura elevati, attorno a 1350 MPa. Per quanto riguarda la propagazione delle cricche a fatica, le ghise sferoidali austemperate presentano un comportamento migliore rispetto a quello delle ghise sferoidali convenzionali in tutte e tre le regioni della curva di Paris.

BIBLIOGRAFIA

[1] S. Lampman, "Fatigue and Fracture Properties of Cast Iron", ASM International, 665-679, 1996.

[2] L.R. Jenkins, R.D. Forrest, "Ductile Iron", in Metal Handbook - 9th Edition, 4, 33-55, 1990.

[3] G. Pradelli, E. Ramous, "Acciai e ghise", in Manuale dei materiali per l'ingegneria, AIMAT, Ed. McGraw-Hill, 240-148, 1996.

[4] C.K. Lin, J.Y. Wei, "High-Cycle Fatigue of Austempered Ductile Iron in Various-Sized Y-Block Castings", Materials Transactions JIM, 38(8), 682-691 (1997).

[5] J. J. Vuorinen, C. Chen, "The Effect of Austenite on Thermal Stability and Fatigue Properties of Austempered Ductile Iron", 61th World Foundry Congress, Beijing, China, Paper n° BBF64-10, 1995.

[6] L. Bartosiewicz, A. R. Krause, F. A. Alberts, I. Singh, S. K. Putatunda, "Influence of Microstructure on High-Cycle Fatigue Behaviour of Austempered Ductile Cast Iron", Materials Characterization, 30, 221-234 (1993).

[7] Y. Tanaka, Z. L. Yang, K. Miyamoto, "Evaluation of Fatigue Limit of Spheroidal Graphite Cast Iron", Materials Transactions JIM, 36(6), 749-756 (1995).

[8] P. P. Rao, P. Padmaprabha, "Effect of Overstressing on Fatigue Behaviour of Austempered Ductile Iron", Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., 11(9), 908-913 (1995).

[9] M. Bahmani, R. Elliott, N. Varahram, "The Relationship Between Fatigue Strength and Microstructure in Austempered Cu-Ni-Mn-Mo Alloyed Ductile Irons", J. Mat. Science, 32(20), 5383-5388 (1997).

[10] P. Shanmugam, P. P. Rao, K. R. Udupa, N. Venkataraman, "Effect of Microstructure on the Fatigue Strength of Austempered Ductile Irons", J. Mat. Science, 29(18), 4933-4940 (1994).

[11] R. B. Gundlach, M. Semchysen, E. P. Whelan, "Notch Sensivity in Austempered Ductile Irons", Proceedings of 1998 SAE International Congress & Exposition, Detroit, MI USA, Paper n° 980685 SAESA2, 1-15, 1998.

[12] C. K. Lin, W. J. Lee, "Effect of Highly Stressed Volume on Fatigue Strength of Austempered Ductile Irons", Int. J. Fatigue, 20(4), 301-307 (1998).

[13] G. P. Faubert, D. J. Moore, K. B. Rundman, Austempered Ductile Iron. Part I: Microstructure and Mechanical Properties of High Alloy Heavy Section Castings, SFA Research, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Michigan Technology University, Houghton, 1990.

[14] H. Bayati, R. Elliott, "Influence of Austenitizing Temperature on Mechanical Properties of High Manganese Alloyed Ductile Irons", Materials Science and Technology, 11, (9), 908-913 (1995).

[15] C. K. Lin, C. S. Fu, "Low-Cycle Fatigue of Austempered Ductile Irons in Various-Sized Y-Block Castings", Materials Transactions JIM, 38(8), 692-700 (1997).

[16] J. R. Hwang, C. C. Perng, Y. S. Shan, "Low-Cycle Fatigue of Austempered Ductile Irons", Int. J. Fatigue, 12(6), 481-488 (1990).

[17] H. Breen, D. V. Dane, DataBase of Critical Technical Information for Austempered Ductile Irons, Final Report of Project A4001, A.S.M.E. Gear Research Institute, 1989.

[18] Committee of Association of European Foundries Ductile Iron, ADI - Strength meets Toughness, Report of 1st European ADI Promotion Conference, Hannover, 1999.

[19] T. J. Marrow, H. Cetinel, "Short Fatigue Cracks in Austempered Ductile Irons (ADI)", Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., 22(3), 425-434 (2000).

[20] Y. Nadot, J. Mendez, N. Ranganathan, A. S. Beranger, "Fatigue Life Assessment of Nodular Cast Irons Containing Casting Defects", Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., 22(4), 289-300 (1999).

[21] K. Fukuyama, N. Hasegawa, K. Inaba, "Fatigue Properties of Austempered Ductile Irons at Room and Elevated Temperatures", Int. J. Fatigue, 18(6), 421-430 (1996).

[22] H. P. Feng, S. C. Lee, C. H. Hsu, J. M. Ho, "Study of High-Cycle Fatigue of PVD Surface-Modified Austempered Ductile Irons", Material Chemistry and Physics, 59, (2), 154-161 (1999).

[23] R. C. Dommarco, P. C. Bastias, H. A. Dall'O, G. T. Hahn, C. A. Rubin, "Rolling Contact Fatigue (RFC) Resistance of Austempered Ductile Irons (ADI)", Wear, 221(1), 69-74 (1998).

[24] C. K. Lin, P. K. Lai, T. S. Shih, "Influence of Microstructure on the Fatigue Properties of Austempered Ductile Irons - I. High-Cycle Fatigue", Int. J. Fatigue, 18(5), 297-307 (1996).

[25] C. K. Lin, T. P. Hung, "Influence of Microstructure on the Fatigue Properties of Austempered Ductile Irons -

- II. Low-Cycle Fatigue", *Int. J. Fatigue*, 18(5), 309-320 (1996).
- [26] N. Notoba, "Retained Austenite and High-Cycle Fatigue Behaviour", *Int. J. Fatigue*, 19(3), 264-274 (1995).
- [27] G. L. Greno, J. L. Otegui, R. E. Boeri, "Mechanisms of Fatigue Crack Growth in Austempered Ductile Irons", *Int. J. Fatigue*, 21(1), 5-43 (1999).
- [28] M. N. James, L. Wenfong, "Fatigue Crack Growth in Austempered Ductile and Grey Cast Irons - Stress Ratio Effects in Air and Marine Water", *Material Science and Engineering A*, 265(1), 129-139 (1999).
- [29] I. Chantier, V. Bobet, R. Billarbon, F. Hild, "A Probabilistic Approach to Predict the Very High-Cycle Fatigue Behaviour of Spheroidal Graphite Cast Iron Structures", *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, 23, 173-180 (2000).
- [30] C. Guillemer-Neel, V. Bobet, M. Clavel, "Cyclic Deformation Behaviour and Bauschinger Effect in Ductile Cast Iron", *Materials Science and Engineering A*, 272(11), 431-442 (1999).
- [31] C. H. Hsu, S. C. Lee, Y. H. Shy, W. T. Chiou, "Relationship Between Dynamic and Static Toughness of Flake and Compacted Graphite Cast Iron", *Materials Science and Engineering A*, 282(4), 115-122 (2000).
- [32] D. Taylor, M. Hughest, D. Allent, "Notch Fatigue Behaviour in Cast Irons Explained Using a Fracture Mechanics Approach", *Int. J. Fatigue*, 18(7), 439-445 (1996).
- [33] E. Gasparini, Caratterizzazione meccanica delle ghise sferoidali austemperate, Tesi di Laurea, Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Università di Padova, A. A. 1999-2000.
- [34] R. E. Peterson, *Stress Concentration Factors*, Wiley, New York, 1974.
- [35] H. Z. Boyerd, *Atlas of Fatigue Curves*, ASM International, 1989.

A B S T R A C T

A DATABASE ON THE FATIGUE BEHAVIOUR OF AUSTEMPERED DUCTILE IRONS

*Austempered ductile irons (ADIs) offer a desirable combination of high strength, ductility, toughness and fatigue strength which are comparable or in some cases superior to those of forged steel. A variety of combinations in the mechanical properties of ADIs can be achieved by proper austempering treatments, due to their particular microstructure consisting of acicular ferrite with carbon-enriched austenite. This microstructure has been called "ausferrite".*

*A number of experimental data relative to fatigue test results can be found in the literature, but their presentation is not homogeneous for different authors, in particular as far as the correlation between microstructure and mechanical properties is concerned. For this reason a database was defined by using a commercial software (Microsoft ACCESS" '97), which enabled us to store and then re-analyse the experimental data collected from the literature. At present the data relative to 81 test series are stored: among these 21 test series are relative to conventional ductile irons while 61 are relative to ADIs. Fig. 1 illustrates how details about a test series are input in the database, while fig. 2 synthesizes the database structure and shows how the stored data can be managed.*

*By re-analysing the collected data, it was possible to find out useful correlations between static and fatigue properties and the characteristics of the microstructure in order to provide practical guidelines in mechanical design.*

*Concerning the static strength, several authors [5,9,10,14] highlight that as the acicular ferrite contents is increased, with respect to the austenite content, the mechanical static properties increase but the material toughness and ductility decrease. That is demonstrated by figures 3, 4 and 5. In particular fig. 3 reports the static strength as a function of the austenite content and the graphite-nodule size. Fig. 3 shows that as the austempering temperature is increased the austenite content tends to be increased and, as a consequence, the tensile strength is reduced. Fig. 4 and 5 report the percent elongation to failure and the ratio between the yield strength and the tensile strength respectively versus the austenite content.*

*Concerning the fatigue behaviour, most of the collected experimental data refer to rotating bending fatigue tests on smooth and notched specimens characterised by a stress concentration factor  $K_t$  variable between 1.22 and 2.64 and a notch root radius variable between 0.3 and 3 mm. The obtained fatigue behaviour even for smooth specimens is similar to that typical of notched specimens, since fatigue failure start from the graphite nodules, which act as intrinsic notches [4,6,7,9,10,12], as fig. 6 and 7 demonstrate. Such a notch effect is detrimental when the austenite content is small, i.e. for ADIs which have been austempered in order to obtain a high tensile strength. This is shown also in fig. 8 where the fatigue ratio (defined as the ratio between the mean fatigue strength at 2 million cycles and the tensile strength) is plotted versus the tensile strength: austempered ductile irons which exhibit the highest values of tensile strength are characterised by a fatigue ratio as low as 0.1. Finally figures 9 and 10 show the dependence of the inverse slope of the Woehler curve for smooth specimens from the fatigue ratio and the mean size of the graphite nodules respectively.*

*It is widely accepted [7,8,11,12,19] that ADIs exhibit a notch sensitivity lower than an high strength steel. Fig. 11 compares the notch sensitivity  $q$  for ADIs with other metallic materials [35]. Moreover fig. 12 reports  $q$  for ADIs having a tensile strength between 1000 and 1350 MPa. The experimental data were obtained on specimens having circumferential notches and notch root radii between 0.6 and 3 mm. The few available data conform that the notch sensitivity for ADIs increases as the tensile strength is increased and that for a tensile strength approximately equal to 1350 MPa,  $q$  is almost equal to that of an annealed steel. Fig. 13 reports the inverse slope of the Woehler curve for notched specimens versus the fatigue ratio: it is interesting to note that the  $k$  values vary in the same range reported in fig. 9 for smooth specimens.*

*Further to the conventional fatigue analysis, the fatigue behaviour in the field of fracture mechanics was also analysed. Table 1 compares the characteristic parameters of the Paris curve found for ADIs and other metallic materials [35], while fig. 14 schematically reports the curves and shows the high threshold value of the stress intensity factor typical for ADIs if compared with conventional ductile irons.*