

# Difetti di fusione, microstruttura e resistenza a fatica di getti in lega d'alluminio

M. Boniardi, M. Margariti, S. Beretta  
Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano  
P.zza L. da Vinci 32, I-20133 Milano

## SOMMARIO

La resistenza a fatica di componenti meccanici in presenza di difetti insiti nel processo tecnologico di ottenimento (ad esempio getti, trafilati, estrusi, fucinati, ecc...) è un problema di notevole interesse soprattutto nel caso di lotti di serie. In tale situazione infatti è necessario avere una stima sufficientemente affidabile del limite di fatica inferiore di resistenza del lotto.

In accordo alle moderne metodologie di indagine, proposte in particolare da Murakami ed Endo [1, 2], è possibile stimare il limite di fatica in presenza di difetti, assimilandoli a microcricche e calcolando con le metodologie tipiche della meccanica della frattura, la sollecitazione ciclica limite che non provoca la propagazione per fatica di tali microcricche. Il presente lavoro, basato sull'attività teorico-sperimentale già da tempo intrapresa dagli autori in tale campo, riporta alcuni risultati delle ricerche svolte su getti in lega leggera tipo AlSi7Mg per applicazioni nell'industria automobilistica (collettori e teste motori). In particolare, a differenza di altri lavori pubblicati in precedenza [3, 4], si è cercato di correlare tra loro le difettosità rilevate con le caratteristiche microstrutturali della lega impiegata ed il relativo comportamento meccanico.

## 1. INTRODUZIONE

Nell'ambito delle applicazioni industriali ove la richiesta di un'elevata resistenza meccanica si associa con la necessità di una limitazione del peso dei componenti, l'impiego delle leghe leggere risulta particolarmente vantaggioso. Se a questo si collega la possibilità di realizzare i componenti per fusione o stampaggio con una forma molto prossima a quella del pezzo finito, è possibile conseguire consistenti risparmi economici specialmente su prodotti di grande serie. Tali vantaggi si scontrano però con la necessità di dover garantire proprietà meccaniche e metallurgiche ottimali e severi requisiti di affidabilità e sicurezza [5].

Nel caso dei getti, ad esempio, le inferiori proprietà meccaniche e la minore affidabilità sono causate principalmente dalla presenza di difetti e disomogeneità tipiche e intrinseche del processo produttivo che possono agire da inneschi preferenziali per cedimenti per fatica e/o per fratture fragili [3, 6].

Il trattamento numerico di questi difetti dal punto di vista della resistenza a fatica ha avuto negli ultimi anni risultati interessanti, anche grazie agli strumenti di calcolo attualmente a disposizione. Nelle usuali formule di calcolo della fatica, la resistenza di un pezzo in presenza di intagli è in funzione del coefficiente di intaglio  $K_t$  che, tuttavia, nel caso di disomogeneità microstrutturali, risulta praticamente impossibile da calcolare. Per descrivere l'effetto dei difetti è necessario quindi abbandonare gli usuali approcci  $\sigma$ -N o  $\epsilon$ -N, per passare a nuove metodologie di calcolo in cui le disomogeneità sono assimilate a cricche. La limitazione di tali approcci è però legata al fatto che, in questo modo, è possibile descrivere il fenomeno della resistenza a fatica solo in termini di parametri medi, non riuscendo in alcun modo a valutare il limite inferiore di resistenza a fatica che è, invece, il requisito essenziale in termini di sicurezza [7, 8].

Studi recenti hanno dimostrato come il limite inferiore di resistenza a fatica di componenti contenenti difetti e disomogeneità microstrutturali possa essere misurato assimilando i difetti a microcricche [1, 9]. Infatti in una serie di risultati sperimentali su provini contenenti microintagli artificiali ha permesso di dimostrare come, in corrispondenza del limite di fatica, si formino delle microcricche non propaganti. Da questo punto di vista quindi il fattore d'intensità degli sforzi - SIF - è il parametro che permette di unificare la trattazione di cricche e difetti nell'ambito della resistenza a fatica ad alto numero di cicli (vedi figura 1).

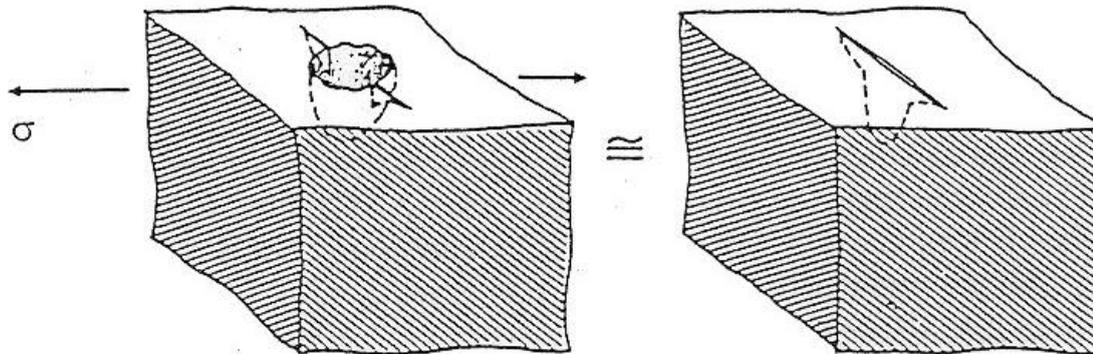


Figura 1: Difetto affiorante alla superficie e cricca equivalente [9]

Il limite di fatica può quindi essere stimato come il livello di sforzo ciclico a cui tali cricche equivalenti non propagano, tramite la relazione  $\Delta K < \Delta K_{th}$ . Poiché i difetti hanno tipicamente dimensioni minori di 1 mm, essi rientrano nel campo delle cosiddette *short cracks* per le quali il valore di soglia di propagazione è funzione dalle dimensioni della cricca stessa (vedi figura 2) [11]. Per descrivere efficacemente la resistenza a fatica di un componente è quindi necessario correlare la variazione di  $\Delta K_{th}$  con la dimensione dei difetti in esame e stimare la dimensione del difetto massimo che può ricorrere in un determinato lotto [10].

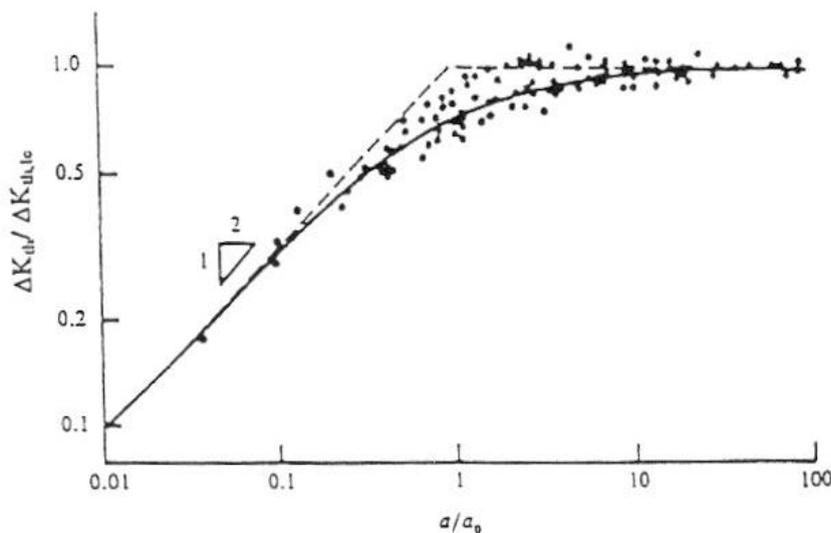


Figura 2: Variazione di  $\Delta K_{th}$  con la dimensione della cricca [11]

Le formulazioni che meglio descrivono il comportamento delle microcricche e dei difetti in acciai e ghise (per difetti nel campo 50-100  $\mu\text{m}$ ), sono quelle proposte da Murakami e

Endo, basate sulla misura dell'area del difetto e della durezza Vickers della matrice [1, 2, 6]. In particolare la relazione proposta, per  $R=-1$ , è:

$$\Delta k_{th} = 3.3 \cdot 10^{-3} \cdot (Hv + 120) \cdot (\sqrt{area})^{1/3}$$

nella quale HV è la durezza della matrice, che rappresenta il parametro caratterizzante il materiale, e  $\sqrt{area}$  è il parametro geometrico che permette di calcolare agevolmente il SIF in cricche e difetti tridimensionali aventi qualsiasi forma.

Tale modello è difficilmente applicabile alle leghe di alluminio in getti per differenti motivi ma, soprattutto, a causa del fatto che, per tale tipologia di materiale, la durezza non è un parametro microstrutturale significativo. I molti studi effettuati sulla propagazione delle cricche in leghe di alluminio hanno fornito, infatti, una notevole dispersione dei risultati, dalla quale non sembra possa emergere alcuna relazione tra le soglie di propagazione delle cricche e i parametri microstrutturali normalmente utilizzati (dimensione media del grano cristallino valutata in termini di *DAS - dendrite arm spacing*) [per una disamina completa del problema si veda 12].

Lo scopo del presente lavoro, in cui viene analizzato il comportamento a fatica di due componenti automobilistici ottenuti per fusione in lega AlSi7Mg, è, invece, quello di cercare di correlare i parametri microstrutturali della lega con la resistenza a fatica del getto stesso confermando, nel contempo, la metodologia di analisi per la stima della resistenza a fatica in getti di lega di alluminio già proposta in altra sede [12]

## 2. PARTE SPERIMENTALE

### 2.1 Componenti e materiali

Oggetto della ricerca sono due componenti per impieghi automobilistici, un collettore di aspirazione e una testa motore (vedi figura 3), ottenuti per fusione mediante il processo Lost Foam (modello a perdere in polistirene espanso rivestito con vernice refrattaria e fusione in sabbia da fonderia). Tale tecnologia è ormai ampiamente consolidata nel settore automobilistico e consente notevoli economie del processo produttivo unitamente ad un miglioramento della qualità finale del getto [13].

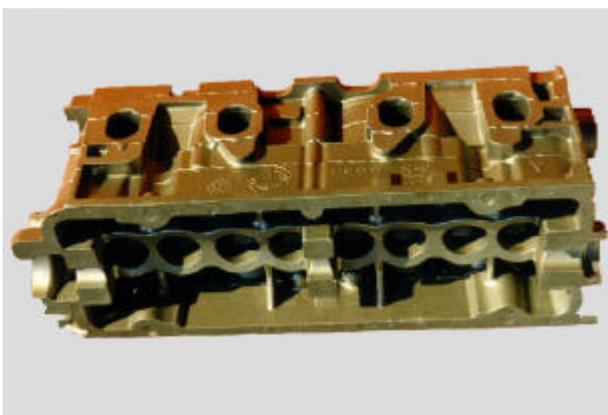


Figura 3: I due componenti automobilistici, testa motore e collettore, oggetto della ricerca.

La composizione chimica nominale della lega d'alluminio impiegata, è riportata in tabella I. La lega utilizzata per la realizzazione dei due componenti è abituale negli impieghi automobilistici, anche se si deve considerare il fatto che la presenza di alliganti quali Fe e Cr, pur se in quantità modeste, possono influenzare sensibilmente le proprietà microstrutturali e resistenziali di queste leghe d'alluminio [7, 14, 15].

<b>Designazione</b>	<b>%Al</b>	<b>%Si</b>	<b>%Mg</b>	<b>%Cu</b>	<b>%Fe</b>	<b>%Cr</b>
G-AlSi7Mg	92.20	7	0.40	0.2	0.2	tracce

Tabella I: Composizione chimica nominale della lega d'alluminio utilizzata

Le caratteristiche meccaniche per i due componenti studiati, ottenute su provini prelevati dai componenti stessi, sono riportate in tabella II. Si osservi come tali caratteristiche siano confrontabili indipendentemente dal tipo di componente esaminato.

<b>Componente</b>	<b><math>R_m</math></b>	<b><math>R_{p0.2}</math></b>	<b>A%</b>	<b>HV</b>
Collettore	264	215	2.5	91±6
Testa motore	250	211	3	90±4

Tabella II: Caratteristiche meccaniche dei due componenti studiati

## 2.2 Prove di fatica

Il comportamento a fatica di getti per impiego automobilistico sono oggetto di numerosi studi. In particolare [12], studiando getti in lega d'alluminio della medesima composizione chimica nominale e realizzati con la stessa tecnologia di fabbricazione, hanno ricavato, mediante prove di fatica assiali ( $R=-1$ ), un valore medio della resistenza a fatica pari a  $77 \pm 6$  MPa.

Nel caso dei componenti in esame la determinazione del limite di fatica è stata effettuata sul solo collettore, sottoponendo alcuni campioni a prove di fatica flessionale rotante tipo stair-case breve [16] (interruzione delle prove a  $10^8$  cicli). Il valor medio della resistenza a fatica ottenuto è risultato pari a  $89 \pm 6$  MPa. Considerando il rapporto tra limite di resistenza a fatica assiale ed a fatica flessionale rotante pari a 0,7 (valido per provini di piccole dimensioni) si ottiene  $62 \pm 5$  MPa.

## 2.3 Esami microstrutturali

Sono quindi state valutate le caratteristiche microstrutturali dei due componenti lungo varie sezioni (con differente spessore del getto) dopo levigatura, lucidatura e attacco con reattivo di Keller. Poiché i due componenti erano stati ottenuti per fusione, è stata eseguita anche la determinazione della dimensione media del grano cristallino (attraverso la misura del parametro DAS) per ogni sezione investigata. I risultati di tale analisi sono riportati in tabella III.

<b>Componente</b>	<b>Spessore del getto (mm)</b>	<b>Dimensione media (mm)</b>	<b>Durezza media (HV)</b>
<b>Collettore</b>			
Provino 1	6	42	87
Provino 2	6	43	98
Provino 3	6	41	88
Provino 4	5	35	96
Provino 5	5	37	90
Provino 6	4,5	30	87
Provino 7	4,5	28	91
Provino 8	4	31	95
<b>Testa motore</b>			
Provino 1	5	43	93
Provino 2	5	42	90
Provino 3	4,5	37	87
Provino 4	4	32	88

Tabella III: Dimensione media del grano cristallino (DAS) vs. spessore del getto per i due componenti analizzati.

I dati ottenuti risultano assai differenti in relazione allo spessore del componente ovvero in relazione alla maggiore o minore velocità di solidificazione del getto. È noto infatti che il tempo di solidificazione ha notevole influenza sulla cinetica di accrescimento della struttura dendritica dei getti [17]. La variazione della durezza Vickers, invece, non mostra una particolare tendenza in relazione alla variazione del parametro microstrutturale indicato (*DAS*).

### 2.3 Ricerca dei difetti

La rilevazione dei difetti è stata eseguita sulle varie sezioni precedentemente caratterizzate in termini microstrutturali. L'esame al microscopio ottico ha permesso di individuare una notevole quantità di difetti riconducibili, sostanzialmente, a due tipiche morfologie: difetti causato dalla presenza di gas e difetti dovuti a cavità di ritiro inter-dendritiche (vedi figure 4 e 5).

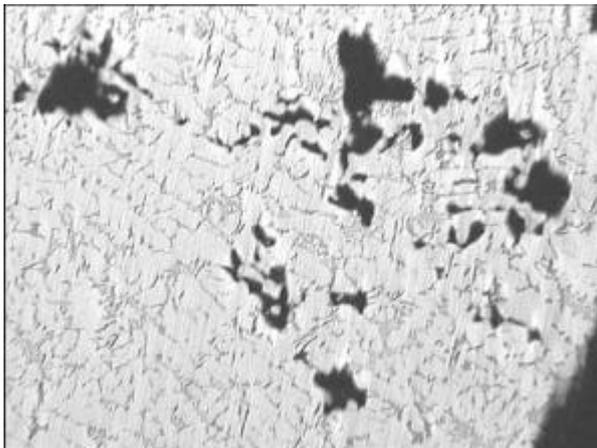


Figura 4a: Collettore: cavità di ritiro (x50)

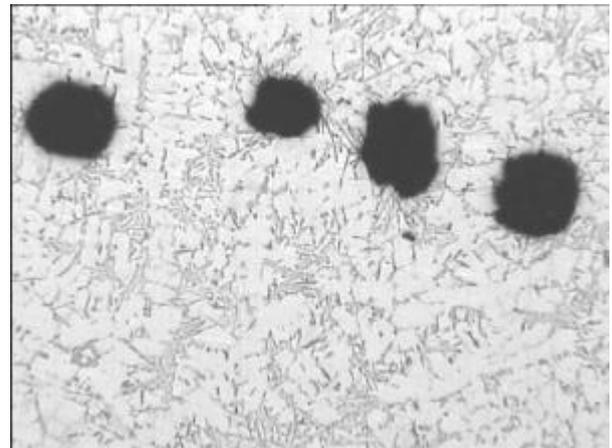


Figura 4b: Collettore: porosità da gas (x50)

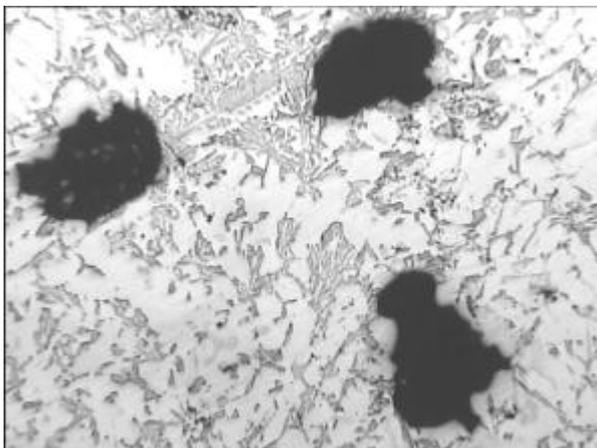


Figura 5: Testa motore: cavità di ritiro (x50)

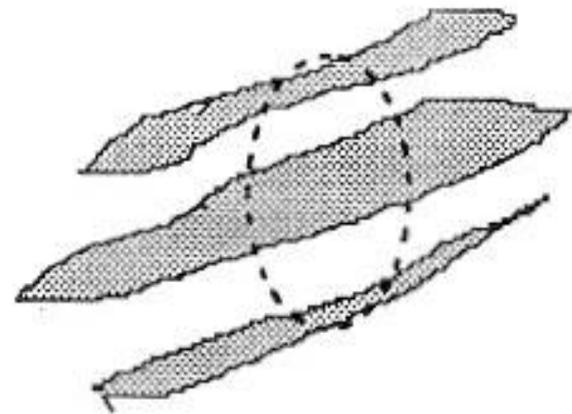


Figura 6: Schema di rilevamento dei difetti tramite lappature progressive [3]

Si è quindi proceduto al campionamento dei difetti per massimi (registrando cioè il massimo difetto rilevato su ciascuna area di controllo) mediante lappature progressive della superficie dei campioni (vedi figura 6). Il dato numerico considerato per la determinazione del SIF è il valore  $\sqrt{\text{area}}$ , espresso come la radice quadrata della proiezione del difetto massimo su un piano perpendicolare alla direzione dello sforzo agente [9]. Le popolazioni di difetti così campionate sono state analizzate con la distribuzione Largest Extreme Value [10, 18]. A titolo di esempio si riporta, in figura 7, la popolazione dei difetti come rilevati da un provino ricavato dal collettore (provino n°1).

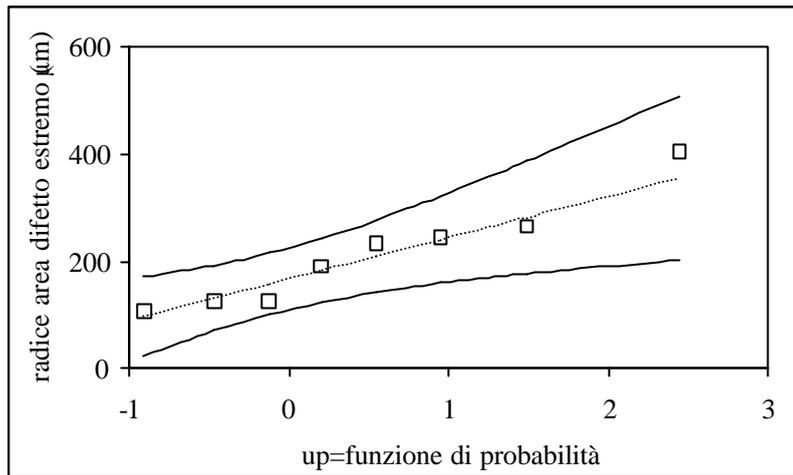


Figura 7: Popolazione dei difetti massimi rilevati sul provino n°1 ricavato dal collettore

Confrontando tra loro i valori delle aree dei difetti per tutti i provini analizzati, nell'ipotesi di considerare un'unica area di controllo, è possibile ottenere il grafico riportato in figura 8 (per praticità tracciato con assi invertiti rispetto a quello di figura 7).

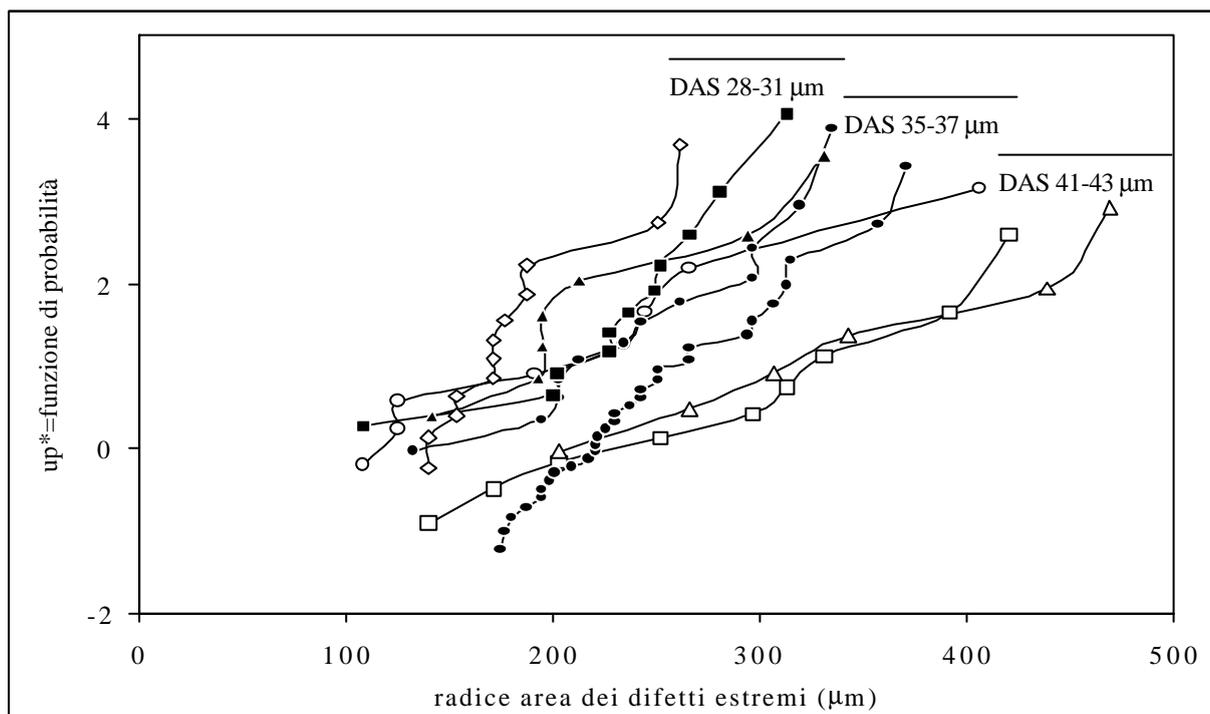


Figura 8: Popolazione dei difetti massimi per gli otto provini analizzati sul collettore

Si noti come vi sia una significativa influenza del parametro microstrutturale sulla dimensione del difetto estremo rilevato in corrispondenza di ciascuna area di controllo. Muovendosi, infatti, in direzione crescente lungo l'asse delle ascisse si osserva un aumento del parametro microstrutturale concomitante con un aumento della dimensione del difetto estremo.

Attraverso l'elaborazione statistica dei risultati (per ogni singolo provino) è possibile stimare la dimensione delle discontinuità (difetto estremo) che ricorrono ogni 1000 provini: il risultato è mostrato graficamente in figura 9, ove si è correlato tale valore con il parametro microstrutturale precedentemente misurato (DAS).

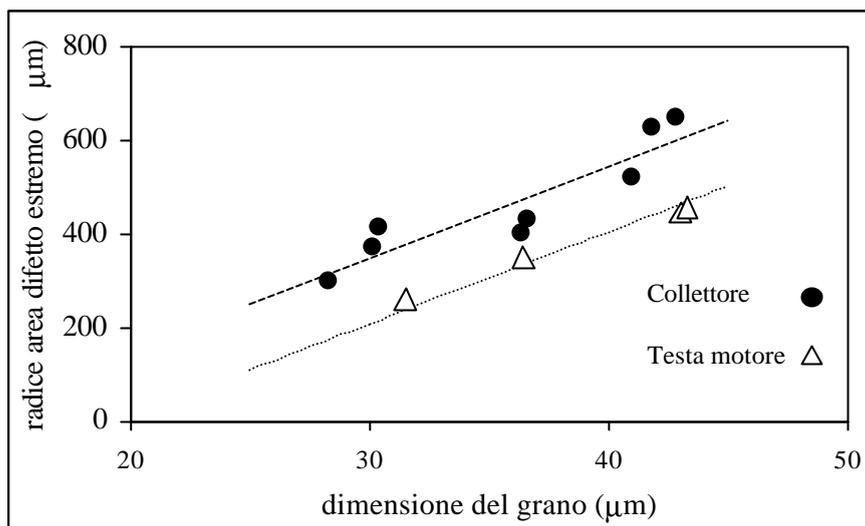


Figura 9: Dimensione media del grano cristallino (*DAS*) vs. dimensione del difetto estremo

Si noti come i difetti del collettore presentino dimensioni sensibilmente maggiori rispetto a quelli della testa motore anche se, in entrambi i casi, si osserva il medesimo andamento lineare crescente ed una correlazione simile tra dimensione dei difetti e parametro microstrutturale.

### 3. STIMA DEL LIMITE DI FATICA

Sulla base della stima dei difetti estremi precedentemente svolta, è ora possibile ricavare il valore di  $\Delta K_{th}$  in corrispondenza del quale il difetto non propaga ovvero determinare il livello di sollecitazione di un componente contenente un dato difetto (assimilato ad una cricca) che non permette la propagazione del difetto stesso: tale valore coinciderà con lo sforzo ciclico limite cioè con il limite di fatica (approccio alla Murakami-Endo).

Nel caso in esame, non potendo disporre di dati di fatica relativi alle correlazioni tra  $\Delta K_{th}$  e la dimensione dei difetti, si è fatto riferimento a quanto già ricavato da uno degli autori del presente lavoro per il medesimo materiale (AlSi7Mg) nelle stesse condizioni tecnologiche di ottenimento dei componenti (fusioni in sabbia)[12]. Le correlazioni utilizzate sono riportate in figura 10.

$$\Delta K_{th} = 0.443 \cdot (\sqrt{area})^{1/3}$$

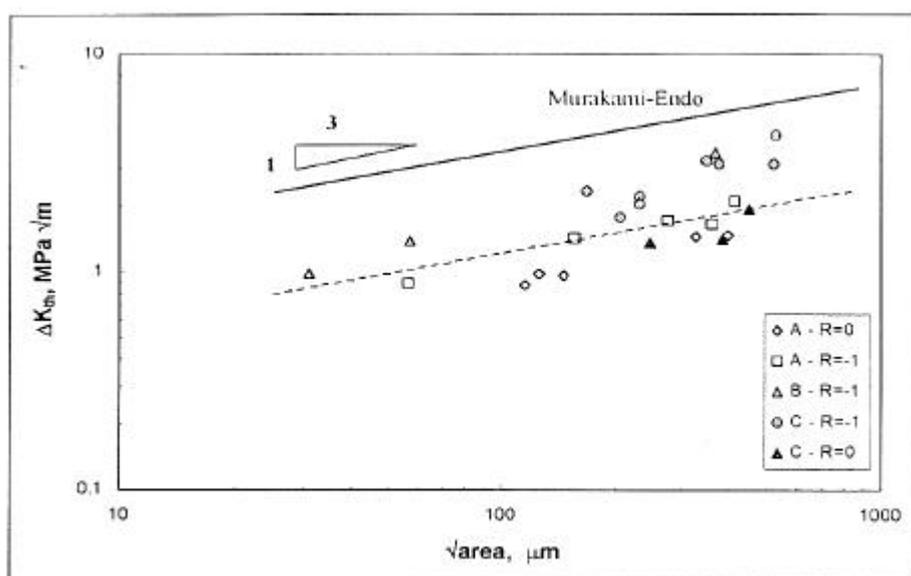


Figura 10: Correlazione numerica e grafica tra soglia di propagazione e dimensione del difetto [12].

Considerando ora che il SIF può essere calcolato utilizzando la seguente formula (valida solo per i difetti interni) [9]:

$$\Delta K = 0.5 \cdot \Delta S \cdot \sqrt{p} \cdot \sqrt{\text{area}}$$

nella quale  $\Delta K_{th}$  è espresso in  $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  e  $\sqrt{\text{area}}$  in  $\mu\text{m}$ , è possibile ricavare il limite inferiore della resistenza a fatica considerando la dimensione del difetto estremo. I dati ottenuti sono stati riportati in tabella IV, sia per il collettore che per la testa motore.

	<b>Difetto estremo <math>\bar{\sigma}_{area}</math> [mm]</b>	<b>Soglia propagazione <math>DK_{th}</math> [MPa]</b>	<b>Limite di fatica <math>DS_{lim}</math> [MPa]</b>
<b>Collettore</b>	298.4	2.96	74.4
	373.8	3.19	71.7
	400.9	3.27	70.8
	415.2	3.31	70.4
	432.6	3.35	69.9
	520.8	3.56	67.8
	629.9	3.80	65.7
	649.8	3.84	65.4
<b>Testa Motore</b>	260.3	2.83	76.1
	351.1	3.13	72.4
	446.5	3.39	69.6
	458.2	3.42	69.3

Tabella IV: Stima dei limiti di fatica per i singoli provini del collettore e della testa motore

Si può notare come la stima calcolata risulti essere in buon accordo sia con i dati sperimentali precedentemente indicati (disponibili per il solo collettore e pari a  $\Delta\sigma = 62\pm 5$  MPa) sia con i dati già disponibili in letteratura ( $\Delta\sigma = 77\pm 6$  MPa) [12].

#### 4. CONCLUSIONI

Le analisi svolte hanno permesso di ottenere stime affidabili della resistenza a fatica di due componenti in lega di alluminio tipo AlSi7Mg. In particolare lo studio ha permesso di correlare tra loro la dimensione dei difetti estremi, le caratteristiche microstrutturali della lega ed il limite inferiore di resistenza a fatica, almeno in relazione all'applicazione ed alla tecnologia di ottenimento dei getti utilizzata (processo *Lost Foam*).

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] Y. Murakami, M. Endo, *Int. J. of Fatigue*, vol. 16, p.163-182, 1994.
- [2] Y. Murakami, M. Endo, *Engng. Fract. Mech.*, vol. 17, p.1-15, 1983.
- [3] S. Beretta, T. Giunti, Atti del XII Convegno Nazionale del Gruppo Italiano Frattura, Parma 1996, p.359-370.
- [4] S. Beretta P. Clerici, Atti della giornata di studio "La Fatica nelle leghe di Alluminio", AIM, Padova, 1997, n°7.
- [5] T. Kobayashi, H. J. Kim, M. Niinomi, *Mater. Science & Tech.*, vol. 13, p.497-502, 1997.
- [6] S. Beretta, A. Blarasin, M. Endo, T. Giunti, Y. Murakami, *Int.J.Fatigue*, vol.18, p.319-333, 1997.
- [7] A. Wickberg, G. Gustafsson, L-E. Larsson, SAE paper n°840121, 1984.
- [8] C. M. Sonsino, J. Ziese, *Int. J. Fatigue*, vol. 15, p.75-84, 1993.
- [9] Y. Murakami, M. Endo, Proc. Int. Conf. The Behaviour of Short Fatigue Cracks (K. J. Miller and E. R. De Los Rios eds.), M.E.P., London, 1986.

- [10] Y. Murakami, T. Toriyama, E. M. Coudert, *J. Testing and Eval.*, vol. 22, p.318-326, 1994.
- [11] S. Suresh, Fatigue of Materials, Cambridge Univ. Press, 1991.
- [12] S. Beretta, Y. Murakami, *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, vol.21, p.1049-1065, 1998.
- [13] J. R. Davis ed., Aluminum and Aluminum Alloys, ASM Speciality Handbook, ASM, Materials Park, OH, 1993.
- [14] K. T. Kashyap, S. Murali, K. S. Raman, K. S. S. Murthy, *Mater. Science & Tech.*, vol. 9, p.189-203, 1993.
- [15] Y. H. Tan, S. L. Lee, H. Y. Wu, *Int. J. Fatigue*, vol. 18, p.137-147, 1996.
- [16] A. Brand, J. F. Flavenot, R. Grégoire, C. Tournier, Données Technologiques sur la Fatigue, CETIM, Paris, 1989.
- [17] M. C. Flemings, Solidification Processing, McGraw Hill, New York, 1974.
- [18] E. J. Gumbel, Statistics of Extremes, Columbia Univ. Press, New York, 1957.