Studio della distanza interdendritica (DAS) in teste cilindri prodotte tramite colata in gravità con differenti leghe di alluminio

B. Zhang, M. Garro, S. Guelfo, M. Rosso

La distanza interdendritica (dendrite arm spacing - DAS) definita come la distanza tra le adiacenti protuberanze dei bracci secondari di una serie di dendriti, negli ultimi anni è stata usata per descrivere la struttura metallurgica dei materiali colati per componenti automobili. E' noto che i componenti colati che presentano una microstruttura molto fine mostrano migliori proprietà a trazione e a fatica, in particolare, per le leghe di alluminio utilizzate in fonderia, questo miglioramento è legato strettamente a un basso valore del DAS. In effetti, più piccolo risulta il valore del DAS e minore è la dimensione dei difetti formatisi durante la solidificazione dell'eutettico (segregazioni, cavità da ritiro, inclusioni di ossidi e porosità da gas). Lo scopo del presente lavoro è stato quello di studiare i fattori che influenzano il DAS delle teste cilindri in alluminio prodotte dagli stabilimenti Teksid Aluminum S.r.l. con la tecnica di colata in gravità in SPM (semi-permanent mould). La ricerca è stata suddivisa in tre fasi distinte per permettere un'analisi il più accurata possibile dei fattori di dipendenza del DAS. In una prima fase è stata rilevata la misura del DAS su campioni prelevati da una provetta di geometria molto semplice, colata a parte e su un unico modello di testa cilindri preso a riferimento e prodotto con tre differenti leghe ipoeutettiche di impiego corrente per la produzione di questo particolare. Lo scopo di questo primo stadio di ricerca è stato quello di valutare, a parità di geometria, l'influenza sul DAS della composizione chimica della lega. I risultati sperimentali hanno messo in evidenza che l'aumento in percentuale di elementi alliganti, quali silicio e rame, determina una riduzione dei valori di DAS. Durante la seconda fase di studio sono stati valutati i fattori di processo che influenzano la velocità di solidificazione dei getti reali, quali la temperatura di colata, la temperatura della conchiglia e la configurazione geometrica della zona delle camere di scoppio. A parità di temperatura di colata, il DAS delle teste cilindri diminuisce con il diminuire della temperatura della conchiglia. Tuttavia, riducendo la temperatura di colata all'interno del range permesso dal mantenimento della qualità metallurgica, si è ottenuto un più diretto e marcato effetto sulla riduzione del DAS rispetto a quello ottenuto riducendo la temperatura della conchiglia di colata. Al contrario, una eccessivamente elevata temperatura di colata può portare a getti con DAS elevato e scarse proprietà meccaniche. Sono, infine, state investigate teste cilindri con configurazioni geometriche diverse in zona di camera scoppio. E' stato riscontrato che il DAS misurato su colonnine/supporti albero a camme risulta minore rispetto a quello rilevato su teste cilindri alimentate su sedi candela o sedi iniettori in cui il DAS aumenta con l'aumento della distanza dalla superficie della camera di combustione (la temperatura del metallo nella zona della camera di combustione, dove il DAS viene misurato, può essere più elevata rispetto all'altra soluzione geometrica).

Parole chiave: alluminio e leghe, solidificazione, getti, caratterizzazione materiali

INTRODUZIONE

La solidificazione delle leghe di alluminio da fonderia inizia con la separazione dal liquido di una fase alfa primaria. Dopo la enucleazione, quando la temperatura si abbassa, la fase primaria cresce come cristalli solidi di forma dendritica. Al raggiungimento della temperatura eutettica, la solidificazione procede a temperatura costante con la formazione della fase eutettica solida nello spazio tra i bracci interdendritici (figura 1).

B. Zhang, M. Garro
Teksid Aluminum S.r.l., Carmagnola (TO)

S. Guelfo, M. Rosso
Politecnico di Torino, Dip. di Scienza dei Materiali e Ingegneria Chimica, Torino

La distanza interdendritica (dendrite arm spacing – DAS -), che è definita come la distanza tra i bracci adiacenti della dendrite, è stata utilizzata negli anni recenti come parametro per descrivere la struttura metallurgica dei getti. Si è riscontrato, infatti, che i getti che hanno una microstruttura più fine mostrano migliori proprietà a trazione e a fatica e, in particolare per i getti in leghe di alluminio, questo miglioramento è in relazione a un basso valore di DAS.
In effetti, più basso è il valore del DAS e minore è la dimensione dei difetti che compaiono durante la solidificazione dell'eutettico come la segregazione, il microritiro e la porosità da gas che sono dannosi alle proprietà tensili.
La dimensione delle dendriti è condizionata non solo dalla composizione chimica della lega ma anche dalla fase di colata e in specifico dalla velocità di trasferimento del calore dello stampo durante la solidificazione. A causa dell'evidente importanza del DAS, sempre un maggior numero di indu-

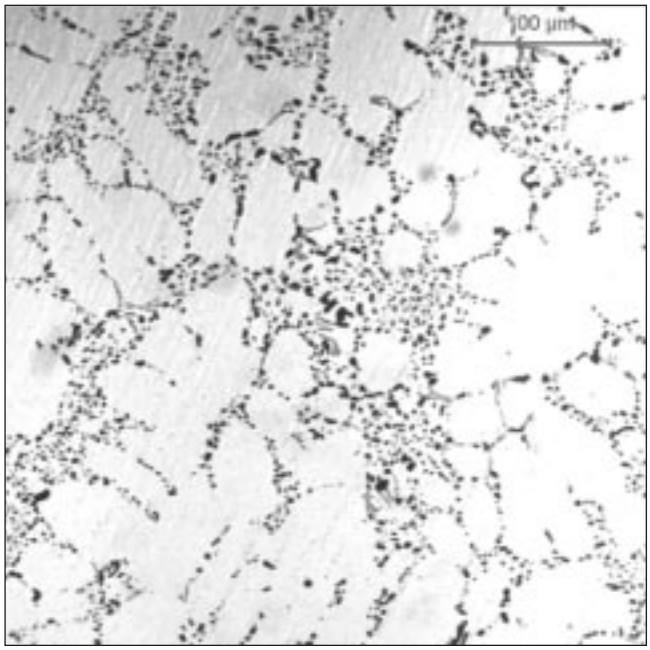

Fig. 1 – Tipica microstruttura di una lega di alluminio da getto: dendriti (chiare) e eutettico (scuro).

Fig. 1 – Cast aluminium alloy microstructure: dendrites (light areas) and eutectic (dark areas).

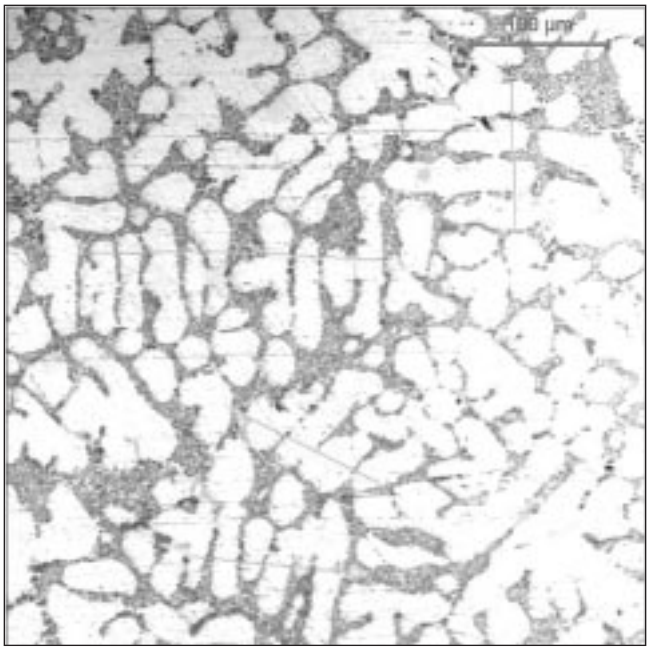

Fig. 2 – Esempio di valutazione del DAS.

Fig. 2 – Examples of DAS measurement.

strie automobilistiche hanno definito un limite a tale parametro nelle loro specifiche per i getti in alluminio. Negli ultimi 50 anni sono stati pubblicati molti articoli sui fattori che influenzano il DAS e sulla relazione tra DAS e proprietà meccaniche delle leghe di alluminio da colata [1-6]. La maggior parte di queste ricerche sono state condotte utilizzando provini colati a parte in forme in sabbia nelle quali le velocità di solidificazione necessarie per ottenere diversi DAS vengono controllate variando lo spessore, la posizione del raffreddatore o la dimensione del campione.
In una produzione a scala industriale è più difficile controllare la velocità di solidificazione e quindi il valore del DAS per diverse ragioni:

- la complessità e la forma dei componenti (per esempio componenti motore che possiedono molte cavità ravvicinate),
- la necessità di ottenere una solidificazione direzionale in modo da realizzare un getto privo di macro-difetti e con qualità soddisfacenti nel suo intero volume,
- una efficiente asportazione di calore è possibile solo in prossimità delle pareti dello stampo,
- il sistema di colata (canale) ed alimentazione (montante) è condizionato/influenzato dalla geometria del componente.

A causa di quanto detto, dopo una prima fase di studio su getti dalla semplice geometria, l'analisi del DAS è stata condotta su getti reali dalla forma complessa come teste cilindri di normal produzione allo stabilimento Teksid Aluminum di Carmagnola con la tecnologia di colata in gravità con forma semi-permanente. In particolare, l'attenzione è stata focalizzata sull'effetto della composizione della lega (colando la stessa forma con diverse leghe utilizzate comunemente nello stabilimento Teksid Aluminum), sull'effetto della geometria del componente e sui parametri di processo come la temperatura del metallo liquido o delle pareti dello stampo vicine al sistema di raffreddamento.

PROCEDURA SPERIMENTALE

Per calcolare il DAS è stato utilizzato il metodo del braccio secondario (fig. 2) che consiste nel misurare la distanza totale della dendrite (tramite analisi di immagine con software Leica) e dividerla per il numero dei bracci secondari. Per ogni campione sono state scattate due foto e il DAS medio è stato calcolato dopo 10 misurazioni.
I campioni per il microscopio ottico sono stati preparati con le normali tecniche metallografiche di lucidatura e attacco.
Il valore di DAS delle teste cilindri è stato valutato utilizzando campioni tagliati direttamente dall'area della camera di combustione come richiesto dalla maggior parte delle specifiche clienti.
Queste aree sono, infatti, quelle più stressate meccanicamente e termicamente, perciò ne è richiesta una valutazione microstrutturale. La distanza tra la superficie del getto e il punto in cui è stato misurato il DAS è di 1 mm per le teste cilindri dopo lavorazione.
Per valutare l'effetto degli elementi allinganti sul DAS, sono state scelte per questo studio tre leghe di alluminio correntemente in uso all'impianto di Carmagnola per la produzione di diverse teste cilindri per motori a gasolio e benzina. Esse sono le leghe A 356, 354 e 319; la prima è una lega ipoeutettica Al-Si mentre le altre due sono leghe ipoeutettiche Al-Si-Cu (tabella 1).

	Lega	Composizione chimica					
		Si	Cu	Mg	Ti	Fe	Mn
Motori diesel	A 356	6.5-7.5	Max 0.2	0.25-0.45	0.10-0.20	Max 0.2	Max 0.1
	354	9.0-10.0	0.8-1.3	0.25-0.5	Max 0.1	Max 0.3	Max 0.1
Motori a benzina	319	6.5-8.0	2.8-3.5	0.25-0.5	Max 0.25	Max 0.8	Max 0.5

Tabella 1 – Leghe di alluminio utilizzate per la produzione di teste cilindri nello stabilimento Teksid Aluminum, Carmagnola-Italia.

Table 1 – Aluminium alloys used in cylinder head production at Teksid Aluminum plant, Carmagnola-Italy.

RISULTATI E DISCUSSIONI

Effetto della composizione chimica sul DAS: campioni colati a parte

I campioni sono stati colati separatamente in una forma metallica utilizzando le tre leghe sopra citate. Per le misurazioni del DAS i provini sono stati ricavati da questi getti.
I risultati sono riportati in tabella 2 in cui i valori si riferiscono alle misurazioni di DAS condotte al centro del getto di forma circolare.
Nonostante siano stati utilizzati gli stessi parametri di colata per le tre leghe, la geometria molto semplice e la velocità di solidificazione elevata a causa delle pareti metalliche dello stampo, i valori di DAS riscontrati nelle tre leghe sono risultati molto differenti. In particolare, la lega 319 avente lo stesso contenuto di silicio della A 356 e il 3% di rame mostra un DAS più basso. La lega 354, con un contenuto di silicio più alto e uno intermedio di rame, mostra valori intermedi di DAS.

Effetto della composizione chimica sul DAS: campioni estratti dalla testa cilindri

Lo stesso modello di testa cilindri è stato colato utilizzando le tre diverse leghe e i valori di DAS ottenuti sono riportati nella tabella 3.
Dalla precedente tabella si nota che leghe differenti hanno portato a differenti valori di DAS per la stessa testa cilindri colata utilizzando lo stesso stampo e lo stesso ciclo produttivo e nonostante le temperature del forno e di colata fossero le stesse. E' risultato che $DAS_{A356}>DAS_{354}>DAS_{319}$. Lo stesso andamento è stato confermato da uno studio su campioni colati a parte [7] i cui risultati sono presentati in fugura 3.
Questi risultati possono essere spiegati dalla relazione tra composizione e dimensione della cella dendritica proposto da Spear et al. [1] e riportato in figura 4. Il grafico mostra chiaramente l'influenza sulle dendriti dei quattro maggiori elementi allinganti per le leghe di alluminio. Gli elementi al-

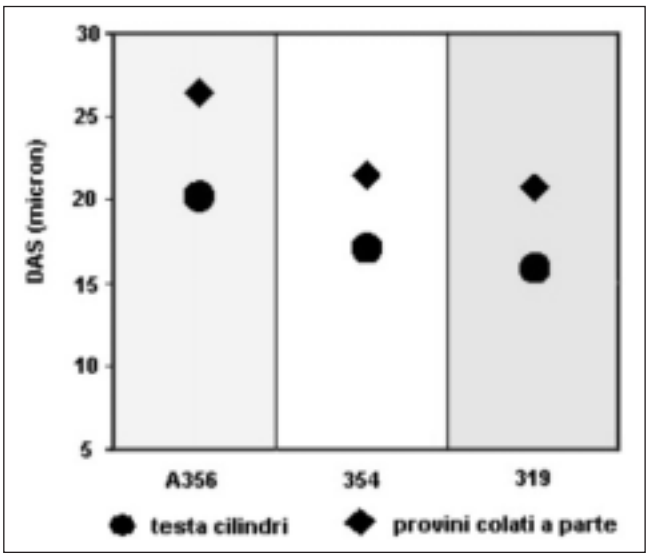

Fig. 3 – DAS di differenti leghe colate valutato sia in provette colate a parte che in campioni estratti da una testa cilindri.

Fig. 3 – DAS of different alloys, tested in separately poured samples and in samples extracted from the same model of cylinder head.

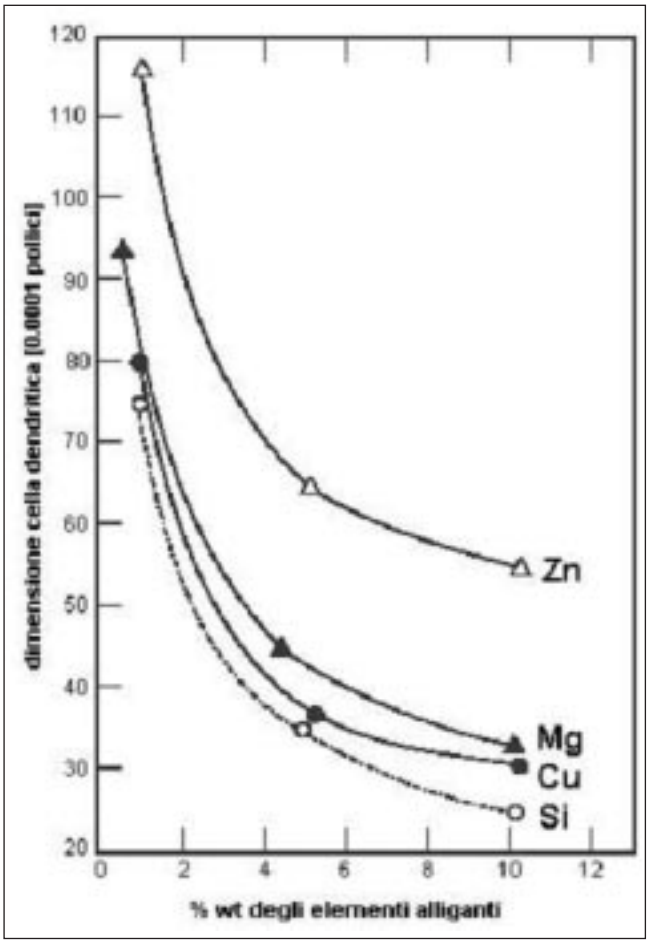

Fig. 4 – Relazione tra il contenuto di alliganti e la dimensione della cella dendritica per l'alluminio. La velocità di raffreddamento della lega è stata di 0.75 F/sec [1].

Fig. 4 – Relationship between alloy content and dendrite cell size for four alloying elements in aluminium. The cooling rate for all alloys has been 0.75 F/sec [1].

Tabella 2 – Valori di DAS rilevati in campioni colati a parte con leghe differenti.

Table 2 – DAS values for separately poured samples cast with different alloys.

Lega	Temperatura del forno (°C)	Temperatura di colata (°C)	DAS medio (mm)	DAS massimo (mm)	DAS minimo (mm)
354	730	705	17.1	19.5	15.5
319	730	705	15.9	18.8	14.0
A 356	720	705	20.2	22.1	16.7

Tabella 3 – Valori di DAS rilevati in campioni estratti da un particolare modello di testa cilindri prodotta utilizzando leghe diverse.
Table 3 – DAS values for samples extracted from cylinder head model cast with different alloys.

Lega	Temperatura del forno (°C)	Temperatura di colata (°C)	DAS medio (mm)	DAS massimo (mm)	DAS minimo (mm)
354	730	718	21.5	27	18
319	732	720	20.7	24	16
A356	729	718	26.4	36	20.6

liganti mostrano un apprezzabile effetto di affinamento quando il loro contenuto varia da 0 a 5 % in peso. Quando il contenuto è superiore al 5%, la dimensione della cella dendritica continua ad essere affinata ma a una velocità minore. Le leghe utilizzate nello stabilimento di Carmagnola (tabella 1) hanno un contenuto di silicio superiore a 5% (il contenuto di magnesio è simile e lo zinco è molto basso per tutte e tre le leghe). In questo contesto si comprende che per i due tipi di leghe Al-Si-Cu (354 e 319), il contenuto di rame che varia da 1 a 4% gioca un ruolo molto importante rispetto al silicio nel ridurre il DAS. La lega 354 ha un DAS più piccolo della lega A 356 a causa dell'effetto sia del silicio che del rame. Tuttavia se si comparano la lega 354 e la lega 319 la prima ha un DAS maggiore rispetto alla seconda nonostante il contenuto di silicio risulti più elevato. Questo avviene a causa dell'effetto del rame il cui contenuto nella lega 319 è superiore al 3% mentre il rame nella 354 è solo circa 1%.

Effetto dei parametri di processo sul DAS

Fissata la composizione delle lega destinata alla produzione di una testa cilindri, la velocità di solidificazione risulta il fattore più importante per determinare il DAS. In una normale produzione di teste cilindri i fattori che possono influire sulla velocità di solidificazione sono:

- temperatura locale dello stampo, specialmente nell'area della camera scoppio della testa cilindri che può essere controllata dal sistema di raffreddamento dello stampo;
- temperatura del metallo liquido durante la colata (temperatura di colata);
- configurazione geometrica della testa cilindri nell'area della camera di combustione e dell'alimentazione.

Tali fattori verranno discussi qui di seguito analizzando diversi modelli di teste cilindri prodotti con le leghe A 356 e 319.

Effetto della temperatura della conchiglia

Per valutare l'effetto della temperatura della conchiglia sul DAS sono state analizzate teste cilindri del tipo HCH colate in lega A 356. Come mostrato in precedenza (tabella 3), il valore di DAS medio per la lega considerata è più elevato che per le altre due leghe analizzate. La figura 5 mostra l'influenza della temperatura nella zona della camera di combustione sul DAS alla temperatura di colata fissa a 720°C. Si nota che il valore di DAS è stato ridotto da 28 mm a circa 22 mm portando la temperatura della conchiglia da 250° a circa 50°C.

Effetto della temperatura di colata

Per valutare l'effetto della temperatura di colata sono state condotte prove sul valore del DAS riducendo tale temperatura in un range permesso dalla metallurgia della lega in modo da continuare a garantire la qualità del getto. I risultati sono mostrati in figura 4. Si è notato che per diminuire il valore del DAS la diminuzione della temperatura di colata è più efficace rispetto alla diminuzione locale della temperatura della conchiglia. Dal confronto tra i grafici di figura 5 e 6 si è visto, infatti, che sul DAS la diminuzione della temperatura di colata di 20°C ha lo stesso effetto alla diminuzione della temperatura della conchiglia di 200°C.

Effetto della posizione di prelievo del provino

Un ulteriore fattore da tenere in considerazione è l'area in cui viene estratto il provino su cui vengono condotte le misure di DAS che per le teste cilindri è a 5 mm di profondità dalla superficie della camera di combustione per i componenti as-cast e a 1 mm dalla stessa per i componenti dopo lavorazione meccanica. La figura 7 mostra la relazione tra la posizione di estrazione del provino (la distanza dalla superficie della camera di combustione lungo le sedi candela) e il DAS. Come ovvio, il DAS aumenta man mano che ci si allontana dalla superficie a causa del ritardo di solidificazione.

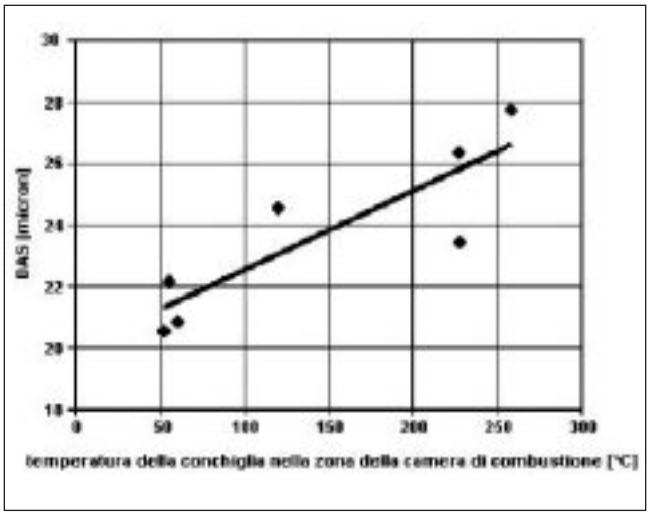

Fig. 5 – Relazione tra la temperatura della conchiglia nella zona della camera di combustione e il DAS per il modello testa cilindri HCH (temperatura di colata di 720°C).

Fig. 5 – Relationship between mould temperature in combustion chamber and DAS for the HCH cylinder head model (pouring temperature of 720°C).

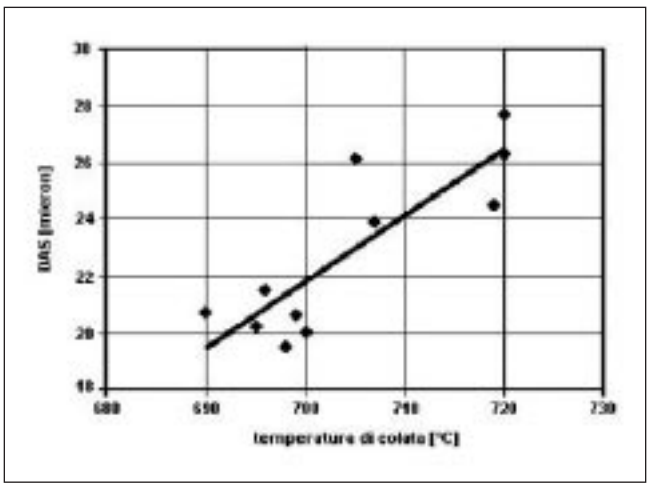

Fig. 6 – Relazione tra la temperatura di colata e il DAS per il modello testa cilindri HCH.

Fig. 6 – Relationship between pouring temperature and DAS for HCH cylinder head model.

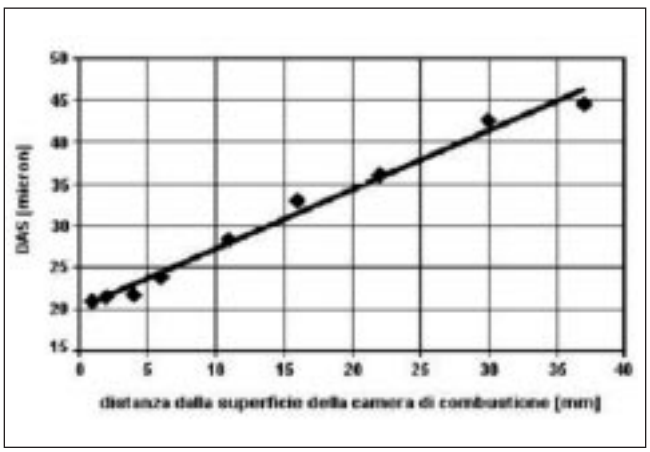

Fig. 7 – Valori di DAS misurati nella testa cilindri modello HCH a differenti zone di prelievo.

Fig. 7 – DAS values of HCH cylinder head models measured in different a test locations.

Testa cilindri	FF8	FF16	FT16	FV6
Temperatura di colata (°C)	690	695	705	715
DAS (mm)	20	29	30	27
Posizione di alimentazione	Colonnine/supporti albero a camme	Sedi candela o sedi iniettore	Sedi candela o sedi iniettore	Colonnine/supporti albero a camme

Tabella 4 – Temperature di colata e valori di DAS per diversi modelli di teste cilindri.

Table 4 – Pouring temperature and DAS of different cylinder head models.

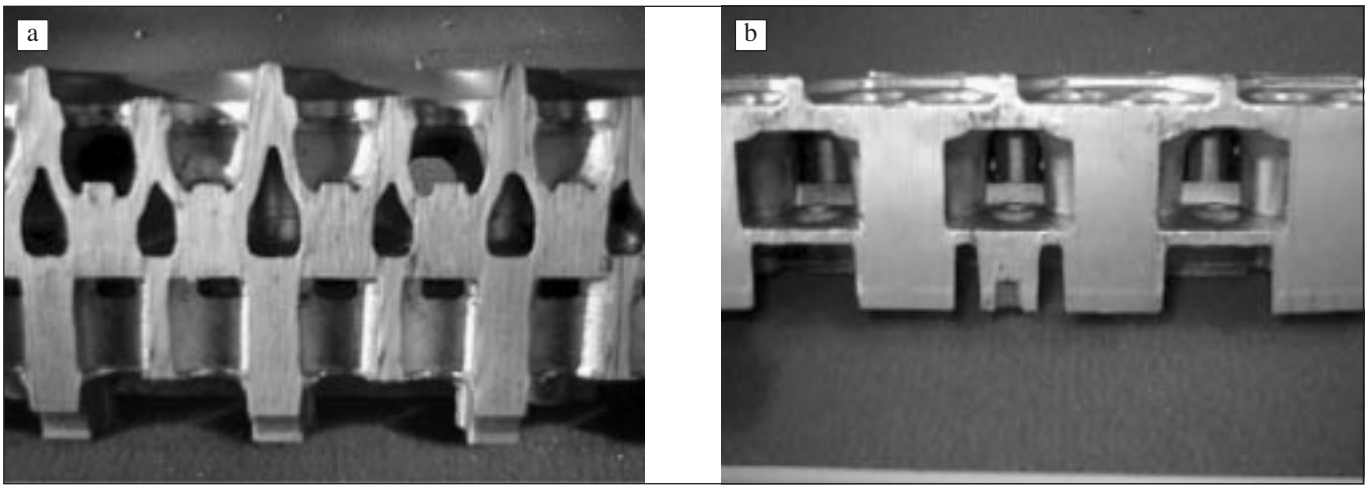

Fig. 8 – Configurazioni geometriche delle teste cilindri nella zona della camera a scoppio: (a) alimentazione tramite colonnine/supporti albero a camme; (b) alimentazione su sedi candela o sedi iniettore.

Fig. 8 – Geometric configurations of cylinder heads in combustion chamber zone (a) fed on bolt bosses/camshaft bearings and (b) fed on spark plug bosses.

Influenza della configurazione geometrica delle teste cilindri

Analisi sui diversi modelli di teste cilindri colati con la lega 319 hanno rivelato che l'influenza sul DAS della temperatura (sia la temperatura di colata che la temperatura della conchiglia nella zona della camera di combustione) risulta molto complessa.

La tabella 4 mostra i valori di temperatura di colata e del DAS per quattro differenti modelli di testa cilindri colati in 319.

Confrontando FF16 con FV6, la temperatura di colata per il secondo modello è di 20°C maggiore rispetto al primo; in più, la temperatura della conchiglia nell'area di prelievo del DAS per FV6 è maggiore di 100°C rispetto a FF16. Nonostante ciò il modello FV6 presenta un DAS minore del modello FF16. Questo risultato sottolinea l'importanza della configurazione geometrica della testa cilindri. In generale, le teste cilindri alimentate attraverso colonnine/supporti albero a camme possiedono un DAS minore rispetto alle teste cilindri alimentate su sedi candela o sedi iniettore (fig. 8a, 8b).

In effetti i parametri di colata (inclusa la temperatura di colata, il ciclo di solidificazione e il sistema di raffreddamento della conchiglia) per i modelli FF8 e FF16 sono molto simili ma i valori di DAS risultano molto diversi. La temperatura di colata per FV6 è più alta che per gli altri getti ma il suo DAS è più piccolo che nei modelli FF16 e FT, due teste cilindri che sono alimentare su sedi candela o sedi iniettore.

La configurazione geometrica delle teste cilindri risulta quindi molto influente sul valore di DAS poiché influisce direttamente sulla velocità di solidificazione.

CONCLUSIONI

In questo lavoro sono stati studiati i fattori che influenzano il DAS delle teste cilindri prodotte in lega di alluminio con il processo di colata in gravità utilizzando forme semi-permanenti. Le analisi condotte su teste cilindri e campioni colati a parte utilizzando differenti leghe di alluminio hanno mostrato che le leghe ipoeutettiche Al-Si-Cu come la 319 e la 354 hanno un DAS più basso delle leghe ipoeutettiche Al-Si come la A 356. Sia il silicio che il rame hanno un notevole effetto di affinamento del DAS se il loro contenuto varia tra 0 e 5%wt.

Data una temperatura di colata, il DAS delle teste cilindri diminuisce con il diminuire della temperatura della conchiglia. Tuttavia, riducendo la temperatura della colata, nel range permesso dalla qualità metallurgica del getto, si ha un più diretto e marcato effetto sulla diminuzione del DAS che riducendo la temperatura della conchiglia. Una eccessiva temperatura di colata può portare a getti con DAS più alto e proprietà meccaniche minori [8]. La posizione della zona di prelievo dei provini e la configurazione geometrica della testa cilindri influiscono anch'esse sul DAS. Nelle teste cilindri alimentate sedi candela o sedi iniettore, il DAS aumenta con l'aumentare della distanza dalla superficie della camera di combustione. In generale, le teste cilindri alimentate da sedi candela o sedi iniettore hanno mostrato valori di DAS più alti rispetto alle teste cilindri alimentate da colonnine/supporti albero a camme poiché nel primo caso la temperatura del metallo nell'area della camera di combustione, dove viene misurato il DAS, può essere più alta che nel secondo caso.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

[1] Spear, R.E. and G.R. Gardner. Dendrite Cell Size. AFS Transactions 71 (1963), 209-215.

[2] Rhadhakrishna, K., S. Seshan and M.R. Seshadri. Dendrite Arm Spacing in Aluminium Alloy Castings. AFS Transactions 88 (1980), 695-702.
[3] Rhadhakrishna, K. and S. Seshan. Dendrite arm spacing and mechanical properties of aluminium alloy castings. Cast Metals, 2 (1989), 34-38.
[4] Flemings, M. C., T.Z. Kattamis and B.P. Bardes. Dendrite Arm Spacing in Aluminium Alloys. AFS Transactions 99 (1991), 501-506.
[5] Oswalt, K.J. and M. S. Misra. Dendrite arm spacing (DAS): a non destructive test to evaluate tensile properties of premium quality aluminium alloy (Al-Si-Mg) castings. AFS Transactions, 88(1980), 845-862.
[6] Meyer, P., D. Massinon and P. Guerin. Influence of microstructure on the static and thermal fatigue properties of 319 alloys. SAE Paper #970705, (1997). SAE International, Warrendale, PA.
[7] Zhang, B. et al. DAS delle leghe diverse. Internal Report. Teksid Aluminium S.p.A., (2001) (In Italian).
[8] Zhang, B. et al. Caratteristiche meccaniche delle teste cilindri in lega A356 per diversi trattamenti termici. Gravity Die Casting WWEurope Meeting: Activities and Results on Materials. Teksid Aluminium, 6-8 March 2002, Carmagnola, Italy.

ABSTRACT

STUDY OF DENDRITE ARM SPACING (DAS) IN CYLINDER HEADS PRODUCED BY GRAVITY CASTING WITH DIFFERENT ALUMINIUM ALLOYS

Keywords:
aluminium alloys, solidification,
low pressure die casting, materials characterisation

The Dendrite arm spacing (DAS), defined as the distance between the protrunding adjacent secondary arms of dendrite, has been used in recent years to describe the metallurgical structure of cast materials. It is well known that castings having a finer microstructure show better tensile and fatigue properties; particularly in cast alloys, this improvement is related to low DAS value. In fact, the smaller the DAS value, the smaller the size of defects formed during eutectic solidification, such as segregation, shrinkage cavities, oxide inclusions and gas porosity.
This work was focused on the study of the parameters that influence DAS in aluminium alloy cylinder heads produced with the gravity semi-permanent technology at Teksid aluminium S.r.l. plants.
The research has been divided into three different steps. In the first step DAS has been measured on samples taken from specific simple-shaped casting and on a reference cylinder head both poured with three different hypoeutectic alloys that are commonly used for cylinder head production. The aim of this first step was to evaluate the DAS influence on the chemical composition of the alloy with a fixed component geometry. The experimental outcome have shown that an alloying elements enrichment (e.g. silicon and copper) results in a reduction of DAS values.
During the second step process parameters affecting the solidification rate, such as pouring temperature, mould temperature and geometrical configuration of the casting in the combustion area, were studied. For the same pouring temperature, the DAS measured in the cylinder heads decreases proportionally to the decrease of the mould drag temperature. However, reducing pouring temperature, of course within the limits imposed by the casting metallurgical quality needs, results in an even more direct and remarkable decrease of DAS. On the contrary, excessive pouring temperatures can create cast parts with large DAS values and poor mechanical properties.
In the third step cylinder heads with different geometrical configuration in the combustion area were investigated. It was noted that DAS on the cylinder heads fed through bosses/camshaft bearings is lower than the one on cylinder heads fed through spark plug bosses. In the latter case DAS increases with the growth of the distance from the surface of the combustion chamber (metal temperature in the combustion area, where DAS was actually measured, can be higher than in the other geometrical solution).