



Brembo, new Generation of Brake Callipers

Semi-solid casting methods improve the energy savings in high performance cars

by Ivano Gattelli, Gianluigi Chiarmetta* -
Marcello Boschini** - Renzo Moschini*** -
Mario Rosso, Ildiko Peter****

*ATS; **BREMBO spa; ***MaProF sas;

****Politecnico di Torino, Department of Applied Science
and Technology.

Recent research in materials science and production processes toward energy consumption and weight reduction gained significant attention [1-3]. Light alloys and semi-solid processes emerged as good candidates for industrial automotive and aeronautical applications, and the research concentrates on exploring new materials and innovative technologies. In both of these applications the effective control of the microstruc-

ture has been proven being extremely critical and controls the mechanical behaviour of the produced component. Forging, clearly is always the best method, but is also the most expensive one. Casting technologies versus forging are more competitive from economical point of view, while forging is able to guarantee the best performances, thanks to the highest soundness. Castings can be affected by defects (presence of voids or cavities, inclusions and oxides). The new trend is to obtain through new manufacturing route comparable performance compared to the product obtained by traditional processes. Semi-solid processes can reduce the existing gap between casting and forging and during such a process the possibility to better control the defect level can be attained. Employing new and/or recently developed semi-solid methods as squeeze casting, thixoforming and rheocasting one is able to produce component with at least the same level of proper-

ties and performances, but nevertheless the half-century evolution there is a serious demand for additional and more detailed rheological data [4-9]. Using these processes, significant reduction of the defects was obtained, as well as good surface quality and high dimensional accuracy [10, 11]. One of the central issue of the development process is represented by the technological transfer from research labs to industry for affordable mass production. A new rheocasting process suitable for the manufacturing of high performance industrial components is presented in [12, 13], where a method is described for controlling the process route as technological parameter regards. In this paper further steps of the optimization process will be presented supported by some already achieved results in order to further enhance the production process. More in particular, the focus is on brake callipers. The principal goal is related to improve the competitiveness and energy savings in high performance cars. Implementation has been realized by using a special ceramic lost cores in the manufacturing process. Adopting the ceramic cores, enhanced mechanical properties, in terms of stiffness, bending and compression strength has been attained, which are able to withstand the stresses generated during the semi-solid casting process. Additionally, a study on the feasibility will be included here, opening the route for mass production for brake callipers. Superior esthetical characteristics compared to the element produced by gravity casting process are obtained, and at the same time main-

taining an adequate strength. The attained, very promising properties favour their use on very high performance cars. In the future, extension of the proposed process for the production of other important applications are expected.

Production process

The brake callipers (Figure 1) have been produced using an Al-based alloy. In particular, A357 alloy usually employed in semi-solid processes, and chemical composition reported in Table 1 was chosen.

Table 1: Chemical composition (wt. %) of the alloys used

Tabella 1: Composizione chimica (wt. %) della lega utilizzata

Elements Elementi	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
	6.5-7.5	0.19	0.05	0.10	0.45-0.70	0.07	0.25	Bal.



Figure 1: Photograph of the produced Brembo brake calliper

Tecnologie-Fonderia

Brembo, pinze freno di nuova generazione

Le recenti ricerche sui materiali e i processi di produzione per ridurre i consumi energetici e il peso dei veicoli hanno destato grande interesse [1-3]. I processi delle leghe leggere e dei semi-solidi si sono rivelati ottimi elementi nelle applicazioni industriali dell'automotive e dell'aeronautica, e la ricerca si sta concentrando sui materiali e sulle tecnologie innovative. In entrambe le applicazioni il controllo della microstruttura ha dimostrato di essere estremamente critico e di influenzare il comportamento meccanico del componente prodotto. La forgiatura, chiaramente è sempre il metodo migliore, ma è anche quello più costoso. Rispetto alla forgiatura le tecnologie di fusione sono più competitive dal punto di vista economico, mentre la forgiatura è in grado di garantire le migliori prestazioni, grazie ad una solidità più elevata. Le fusioni possono presentare difetti (presenza di vuoti o cavità, inclusioni e ossidi). La nuova tendenza è quella di individuare un percorso di fabbricazione più affidabile per ottenere un prodotto con prestazioni comparabili a quello ottenuto con il processo tradizionale. I processi semi-solidi sono in grado di ridurre il divario esistente tra fusione e forgiatura e di controllare meglio la presenza di difetti. Impiegando i nuovi metodi di colata semi-solido nuovi come o squeeze casting, il thixoforming e il rheocasting, è possibile

Meno difetti e proprietà meccaniche superiori con il processo semisolido

produrre componenti con lo stesso livello di proprietà e prestazioni, ma nonostante mezzo secolo di evoluzione c'è una diffusa richiesta di ulteriori e più dettagliati dati di processo [4-9]. Tramite questi processi, è stata ottenuta una riduzione significativa dei difetti, così come un miglioramento qualità superficiale e una elevata precisione dimensionale [10, 11]. Uno dei problemi centrali del processo di sviluppo è rappresentato dal trasferimento tecnologico dai laboratori di ricerca all'industria per una produzione su larga scala. Un nuovo processo di rheocasting adatto alla produzione di componenti industriali ad alte prestazioni viene presentato in [12, 13], dove è descritto un metodo per controllare il flusso del processo attraverso l'analisi dei parametri tecnologici.

In questo articolo verranno presentati ulteriori fasi del processo di ottimizzazione, supportati da alcuni risultati già conseguiti. In particolare, l'attenzione è focalizzata sulle pinze freno. L'obiettivo principale è quello di migliorare la competitività e il risparmio energetico nelle vetture ad alte prestazioni. L'im-

Figura 1: Pinza freno Brembo fabbricata con il processo di rheocasting

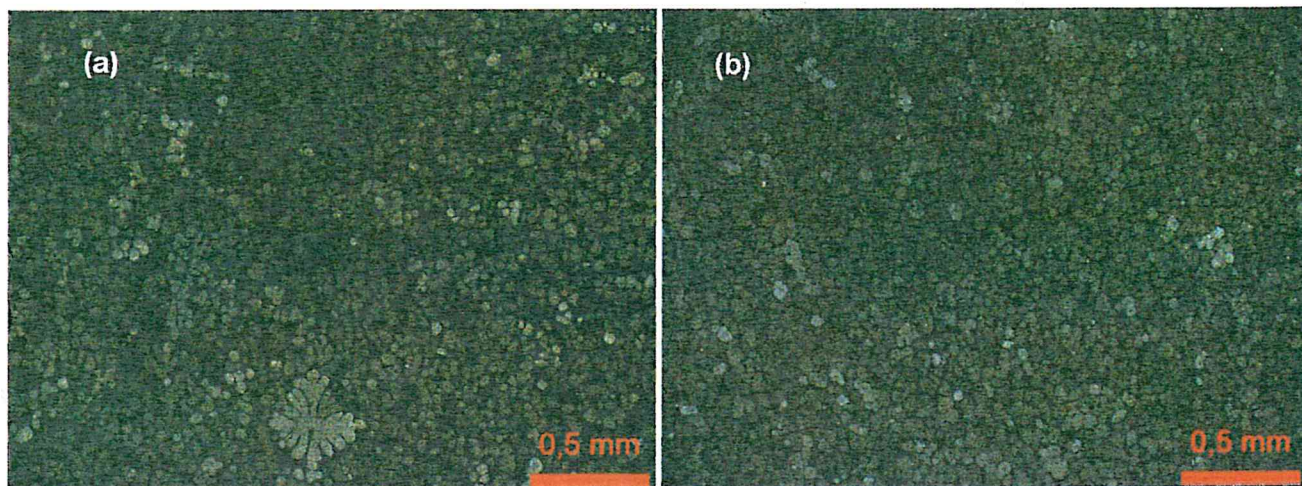


Figure 2:
Microstructure
of the brake
calliper produced
by gravity casting
process (a)
and by rheocasting
process (b)

Figura 2:
Microstruttura
della pinza freno
prodotta da
processo di
fusione per gravità
(a) e da processo
di rheocasting (b)

As concerns the production, an innovative rheocasting process developed in the ATS Company (Lugo di Ravenna, Italy) has been used, by means of a TCS vertical hydraulic press Rotorone 400 tons model. Some detail on the process can be found in [12, 13]. The press has an injection piston of 180 mm diameter; the closure power corresponds to 400 tons with an injection power of 320 tons. The liquid metal is waiting, in Argon atmosphere, to be collected. The process is a three step one. Under the inferior level of the press, a turning table moves with the containers set up at 120°: in the first one there is the slurry which will be injected after rotation; in the second one there is the evacuation of the biscuit; the third one is lubricated waiting from the ladle new quantity of slurry to inject. The two upper and lower half dies are heat controlled by oleodynamic control panels. When the requested injection temperature is reached (between 577°C and 590°C, depending by the employed alloy), the piston pushes the slurry very slowly through the ingate until the filling of the cavity is completed. After a very short time, aiming to maintain the pressure so that the cycle could finish, the piston goes down carrying the biscuit and by consequence cutting off

the ingate piece. When the press opens, the upper part lifts allowing the piece to exit which is facilitated by an ejector. The cycle is ready to continue after lubrication of the die. Standard T6 heat treatment has been performed. Figure 2 reports the dendritic microstructure of the brake calliper produced by gravity casting process (a) and the globular and fine microstructure realized in the case of rheocasting process (b).

The Calliper: a hollow part with undercuts

A significant constraint to be considered when designing High Pressure Die Casting (HPDC) components is related to the need of using steel cores which are required to withstand the forces generated by the high speed metal flow into the die cavity during the filling and the high pressures (800-1500 bar) applied on the liquid metal during the solidification of the casting. Such kind of metallic core does not allow creating undercuts or complex shape cavities into the casting thus limiting the flexibility in the design of the geometry of the component. In the present application, ingate velocities are very low (<1 m/s) but the high packing pressures (>600 bar) and

plementazione è stata realizzata utilizzando una speciale anima ceramica nel processo di fabbricazione. Con l'adozione delle anime ceramiche, sono migliorate le proprietà meccaniche, in termini di resistenza alla flessione, compressione e torsione, facendo sì che possano sopportare le sollecitazioni generate durante il processo di colata semi-solida. Inoltre, la ricerca includerà anche uno studio sulla fattibilità per produrre industrialmente pinze freno su larga scala.

Le caratteristiche estetiche sono superiori rispetto all'elemento prodotto tramite processo di fusione per gravità, mantenendo un'adeguata resistenza. Le proprietà ottenute, molto promettenti, favoriscono il loro uso sulle vetture ad altissima prestazione. In futuro, ci si aspetta che il processo proposto venga esteso ad altre applicazioni importanti.

Il processo di produzione

Le pinze freno (Figura 1) sono state prodotte in lega A357, solitamente impiegata nei processi semi-solidi, ed è stata scelta la

composizione chimica riportata nella Tabella 1.

Per quanto riguarda la produzione, è stato utilizzato un innovativo processo di rheocasting sviluppato dalla società ATS (Lugo di Ravenna, Italia) mediante una pressa idraulica verticale TCS modello Rotorone di 400 tonnellate. Qualche dettaglio sul processo può essere trovato in [12, 13]. La pressa ha un pistone a iniezione di 180 mm di diametro, forza di chiusura pari a 400 tonnellate e 320 tonnellate di spinta. Il processo avviene in atmosfera controllata (Argon).

Il processo si svolge in tre fasi. La pressa è dotata di una giostra di contenitori impostati a 120°: nel primo c'è il metallo liquido che verrà iniettato dopo la rotazione; nel secondo avviene l'evacuazione delle parti in eccesso; il terzo è lubrificato in attesa che la siviera immetta una ulteriore quantità di metallo liquido da iniettare. I due mezzi stampi superiori e inferiori sono controllati a caldo da pannelli di controllo oleodinamici. Quando viene raggiunta la temperatura di iniezione richiesta (tra 577°C e 590°C, a seconda dalla lega utilizzata), il pistone

undercuts are incompatible both with metal- and also with lost sand-cores. In fact, the bonding effect among the sand grains generated by organic or inorganic binders is relatively weak and the resulting mechanical properties of these conventional cores are relatively low, so they are not suitable for applications where overpressures are applied. Therefore, for the production of the calliper, special ceramic lost cores were adopted, able to reach enhanced mechanical properties, in particular in terms of stiffness, bending and compression strength, to withstand the stresses generated during the semi-solid casting process [14]. Radiographic analysis has been performed in parallel to the production process, both to verify the integrity of the samples from metallurgical point of view and individuate and correct the parameters related to the injection step. For the microstructural characterization, optical microscope (OM, Zeiss Observer D1m model) has been employed. The samples have been machined from the produced callipers, and subsequently submitted to mechanical characterization: in particular tensile test (Galdabini Sun 5 model) has been performed and their soundness has been studied by a non-destructive method (NDT, Bosello SRE MAX 225 KVtype).

Results and discussion

Actually, the brake callipers has been manufactured by gravity casting method. Although the process remains a valid procedure from economic point of view and allows obtaining the final products in a relatively short time, as accuracy concerns, there is space for further development. Semi-solid production permits to develop also thin parts with very high precision which is more difficult to realize using traditional processes. The most important benefit by using semi-solid method regards the achievement of an aesthetically pleasing component and this feature constitute a crucially important aspect in high performance car production. In addition, reduction of about 5% of the total weight has been achieved.

The present research has mainly focused on two important aspects:

1. on the performances of the cores in terms of structural behaviour, resistance against metal infiltration, deformation and removal;
2. on the quality of prototype callipers as regards soundness, microstructural features and suitability for heat treatment. Ceramic cores have been employed which are prevalently influencing the appearance of the brake callipers. The hardening mechanism and the structural resistance of ceramic cores are mainly based upon a sintering process: in this way it is possible to obtain cores with a wide range of mechanical properties as a function of the sintering temperature, avoiding, in addition, the limits and problems coming from the conventional organic binders. In the sintering process the single particles of ceramic material are bonded together by diffusion, allowing to reach elevated values of the mechanical properties and modulus of elasticity, well over what is accessible with the use of conventional binders. Even more important, ceramic cores do not contain any kind of binders, i.e. release of gases during the casting process can be avoided. Generally, the main requirements for cores to be used in HPDC processes are summarized as follows:

- mechanical strength: in typical semi-solid forming processes the conditions are usually less severe than in HPDC, in particular for ingate velocity, but in any case overpressure is present. Ceramic cores can offer the desired mechanical properties for each specific application thanks to a tailored sintering process. It is not needed to reach always the maximum obtainable resistance, that makes de-coring more difficult. A first evaluation of the required level of properties may be obtained with the support of numerical simulation tools: the mechanical stresses on the ceramic core when molten material is flowing inside the mould are estimated by means of numeric methodologies post processing the results of the casting process simulation;

spinge il metallo liquido molto lentamente attraverso il canale di colata finché non viene completato il riempimento della cavità. Dopo un tempo molto breve, allo scopo di mantenere la pressione in modo da completare il ciclo, il pistone avanza ulteriormente spingendo la parte in eccesso e staccando il pezzo colato. Quando la pressa si apre, la parte superiore si alza permettendo al pezzo di uscire, facilitato da un eiettore. Il ciclo è pronto a continuare dopo la lubrificazione dello stampo. È stato effettuato così il trattamento termico standard T6. La Figura 2 confronta la microstruttura dendritica della pinza freno prodotta tramite il processo di fusione per gravità (a) e la microstruttura globulare realizzata col processo rheocasting (b).

La pinza: una forma cava con scanalature

Un limite importante da considerare durante la progettazione di componenti di pressofusione ad alta pressione (HPDC) è la necessità di utilizzare anime d'acciaio per resistere alle forze generate dal flusso di metallo ad alta velocità nella cavità del

lo stampo durante il riempimento e le alte pressioni (800-1500 bar) applicate sul metallo liquido durante la solidificazione del getto. Questo tipo di anima metallica non consente la creazione di scanalature o cavità di forma complessa, limitando così possibilità di progettare componenti con geometrie complesse. In questa applicazione, le velocità di colata sono molto basse (<1 m/s), ma le alte pressioni (>600 bar) e le scanalature sono incompatibili con le anime in metallo e in sabbia. Infatti, l'effetto bonding tra i granelli di sabbia generati da leganti organici o inorganici è molto debole e le proprietà meccaniche risultanti da queste anime convenzionali sono molto basse, quindi non adatte per applicazioni con sovrappressioni. Pertanto, per la produzione delle pinze, sono state adottate speciali anime ceramiche, in grado di offrire proprietà meccaniche superiori, in particolare in termini di resistenza alla flessione, alla tensione e alla compressione generate durante il processo di fusione del semisolido [14].

Contemporaneamente al processo di produzione è stata ese-

- once the mechanical stresses on the core have been estimated, a firing temperature for the "green" ceramic core can be established, to give the core a mechanical strength slightly higher than the maximum calculated stresses;
- shape stability: the core should not break and keep its shape without distortion or dimensional changes, even during the packing phase when high hydrostatic pressures are applied;
- dimensional accuracy: required to ensure a correct positioning of the core in the mould through adequate core prints; dimensional precision of ceramic cores depends on the type of applied forming process; considering the resulting shrinkage of all the production steps (forming, drying, sintering), it is reasonable to estimate a dimensional tolerance $<0.5\%$. This average figure might be critical for precise positioning of the core into the die for some applications, but fine tuning solutions can be found for specific cases;
- complex shape: the possibility to form cores with complex shape is extremely important to allow the application to a wide spread of components; this item drives the selection of the forming process for the core. Geometrically simple shapes can, for example, be obtained by axial pressing techniques (dry or wet pressing) but, if the shape is complex, injection molding processes have to be used with dimensional tolerances $<0.05\%$. To produce ceramic lost cores for callipers, wet pressing process was used. The present research allows obtaining some important results as mechanical properties and shape stability concern, and in particular:

1. mechanical strength: as expected, in the semi-solid process limited values of bending strength are acceptable to avoid core breakage: a flexural resistance >12 MPa was good enough for the present application;

2. shape stability: due to high compression resistance (>1500 bar) and adequate Young modulus (>8 GPa) no dimensional changes were observed.

Due to the residual porosity of cores ($<15\%$), a coating was applied on their surfaces to act as a mechanical barrier against infiltration of metal into the cores. The applied solution was successful: no traces of metal penetration was observed. For the removal of ceramic cores from the casting (de-coring), High Pressure Water Jet blasting (HPWJ) was selected, because of its capability to destroy high resistance materials with industrial methods. The de-coring station was equipped with a system for positioning and clamping of the part to be treated and a robot with a special tool capable of carrying 2 types of high pressure nozzles: one of these serves to remove the bulk of the core while the second one employed to remove the ceramic material inside the pistons seats. The nozzles were connected with flexible tubes to a suitable high pressure pump (750 bar). The robot follows a programmed cycle allowing to apply the water jets, properly "shaped" by each nozzle. With this set-up several castings have been processed with various sets of process parameters (water pressure and flow rate, type of nozzle, etc.) until satisfactory results have been achieved: de-cored pieces does not show any residues of ceramics on the internal surfaces.

To check the metallurgical integrity and to individuate and correct the parameters related to the injection step, radiographic analysis has been carried out on the produced components. Depending on the position of the investigated zone and due to the complex shape of the produced component, in some cases higher than 35 mm thickness had to be observed, making the radiographic analysis difficult. Some areas become screened/covered/masked compared to the others. Figure 3 reports a radiograph-

Figura 3:
Immagine
radiografica
della pinza

guita un'analisi radiografica, sia per verificare l'integrità dei campioni dal punto di vista metallurgico sia per individuare e correggere i parametri relativi alla fase di iniezione. Per la caratterizzazione microstrutturale, è stato usato un microscopio ottico (MO, modello Zeiss Observer D1m). I campioni sono stati lavorati con le pinze prodotte, e successivamente sottoposti a caratterizzazione meccanica: in particolare è stata effettuata la prova di trazione (modello Galdabini Sun 5) e la loro solidità è stata studiata da un metodo non distruttivo (NDT, Bosello SRE MAX 225 KVtype).

Risultati e discussione

Attualmente le pinze freni sono prodotte con un processo di fusione per gravità. Nonostante questo processo sia una procedura economicamente valida, per quanto riguarda la precisione dimensionale lascia spazio per ulteriori sviluppi. La produzione semi-solida permette di sviluppare anche parti sottili con altissima precisione, al contrario dei processi di fusione tradizionali. Il vantaggio più importante utilizzando il metodo semi-solido è la realizzazione di un componente esteticamente gradevole e questa caratteristica è un aspetto fondamentale nella produzione di auto ad alte prestazioni. Inoltre, si ottie-

ne la riduzione di circa il 5% del peso totale della pinza. Questo studio si è concentrato principalmente su due aspetti importanti:

1. le prestazioni delle anime in termini di comportamento strutturale, resistenza all'infiltrazione di metallo, deformazione e rimozione;
2. la qualità delle pinze prototipo per quanto riguarda solidità, caratteristiche microstrutturali e idoneità per trattamento termico.

Sono state impiegate anime ceramiche che influenzano anche l'aspetto delle pinze freno. Il meccanismo di indurimento e la resistenza strutturale delle anime ceramiche si basano principalmente su un processo di sinterizzazione: in questo modo è possibile ottenere anime con una vasta gamma di proprietà meccaniche in funzione della temperatura di sinterizzazione, evitando inoltre, i limiti e i problemi provenienti dai leganti organici convenzionali. Nel processo di sinterizzazione le singole particelle di materiale ceramico si legano per diffusione, permettendo alle proprietà meccaniche e al modulo di elasticità di raggiungere valori elevati, ben oltre quelli raggiungibili con l'uso di leganti convenzionali. Dato ancora più importante, le anime ceramiche non contengono alcun tipo di legante, evi-

c image and reveals the absence of defects in the investigated sample.

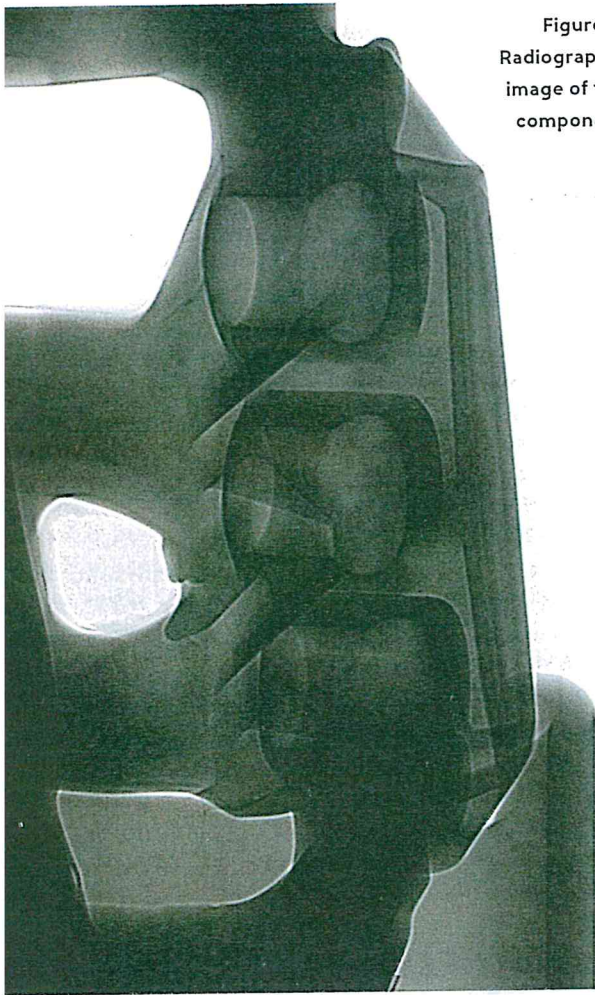


Figure 3:
Radiographic
image of the
component

The most critical parts, as defects concern, evaluated by radiographic inspection have been submitted to microstructural analysis too, after an adequate metallographic preparation. The microstructure of "worst case" castings reveals the presence of some defect. In particular a special type of defect has been observed in Figure 7a: the surface oxide on the liquid is folded in to produce crack-like defects, known as "bifilms" [15, 16]. This kind of defects are extremely thin and the surface turbulence causing the entrainment of bifilms and associated bubbles can be developed as reported in Figure 4b.

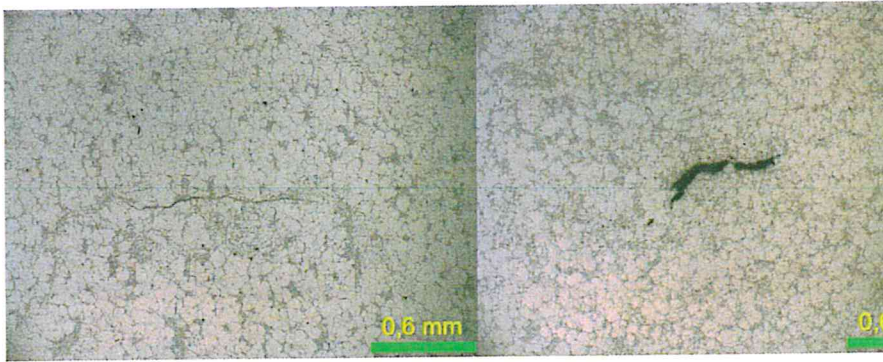


Figure 4:
Microstructures of
scraps showing the
presence of some
defects

In addition to validation bench tests on sound pieces to x-ray screening, further severe braking cycles tests were performed also on pieces "worst case" to evaluate the behaviour of the component even in the presence of identified defects. The results were excellent: following a subsequent x-ray screening, the defects present on the pieces "worst case", previously identified and measured, were not propagated inside the pieces after >106 fatigue cycles with high pressure fluid inside. This demonstrated a high fracture toughness (in terms of stress intensity factor K_{IC}) and a resulting very high reliability of the component. On the basis of the results coming from the fa-

Figura 4:
Microstrutture
di getti con la
presenza di difetti
(bifilms)

tando così il rilascio di gas durante il processo di fusione. Generalmente, i principali requisiti per le anime da utilizzare nei processi HPDC sono i seguenti:
resistenza meccanica: nei tipici processi di forgiatura del semi-solido le condizioni sono di solito meno severe rispetto all'HPDC, in particolare per la velocità di colata, ma in entrambi i casi c'è sovrappressione. Le anime ceramiche possono offrire le proprietà meccaniche desiderate per ogni applicazione specifica grazie ad un processo di sinterizzazione su misura. Non è necessario raggiungere sempre la massima resistenza ottenibile, che rende più difficile la rimozione delle anime. Una prima valutazione del livello di proprietà richiesto può essere ottenuta con il supporto di strumenti di simulazione numerica: le sollecitazioni meccaniche sulle anime in ceramico quando il materiale fuso scorre all'interno dello stampo vengono valutate mediante metodologie numeriche dopo aver elaborato i risultati della simulazione del processo di colata; dopo aver valutato le sollecitazioni meccaniche sull'anima, può essere stabilita una temperatura di cottura per l'anima ceramica "verde", per conferirle una resistenza meccanica alle massime sollecitazioni previste leggermente superiore a quella di massimo stress calcolato;

stabilità di forma: l'anima non deve rompersi e deve mantenere la sua forma senza distorsioni o variazioni dimensionali, anche durante la fase di packing, quando è sottoposta ad elevate pressioni idrostatiche;
precisione dimensionale: necessaria per garantire un corretto posizionamento dell'anima nello stampo attraverso adeguate anime di stampaggio; la precisione dimensionale delle anime ceramiche dipende dal tipo di processo di formatura; considerando il restringimento risultante da tutte le fasi di produzione (formatura, essiccazione, sinterizzazione), è ragionevole stimare una tolleranza dimensionale di <0,5%. Questo valore medio potrebbe essere fondamentale per il posizionamento preciso dell'anima nello stampo per alcune applicazioni, ma si possono trovare soluzioni di ottima sintonia per casi specifici;
forma complessa: la possibilità di forgiare anime dalla forma complessa è estremamente importante per consentire la produzione di un'ampia varietà di componenti; tutto ciò guida la selezione del processo di forgiatura dell'anima. Forme geometricamente semplici, ad esempio, sono ottenibili mediante tecniche di pressatura assiale (pressatura a secco o a umido) ma, se la forma è complessa, i processi di fusione ad iniezione devono essere utilizzati con tolleranze dimensionali inferiori a

tigue test, one can claim that the presence of the defects does not influence negatively and does not compromise in any way the performance of the callipers neither in extreme condition. Certainly, the special globular microstructure seems to be more appropriate than the dendritic one to restrain crack propagations, eventually starting from the damaged areas. Finally, static tensile test has been carried out on dissected specimens: Table 2 summarises the results and also reports the standard requirements (UNI EN 1706/2010) for the sand cast and chill cast A357 T6 heat treated alloy. The measured values exceed the thresholds indicated in the standard.

Table 2:
Average tensile
properties of the
rheocast samples

Samples <i>Campioni</i>	UTS (MPa)	Yield Strength <i>Resistenza</i> (MPa)	Elongation <i>Allungamento</i> (%)
A357 T6 heat treated <i>trattata a caldo</i>	340±14 (*250) (**320)	302±4 (*210) (**240)	4.135±2.7 (*1) (**3)
*sand casting values reported in UNI EN 1706/2010; * valori di fusione in sabbia riportati nella norma UNI EN 1706/2010; **chill casting values reported in UNI EN 1706/2010 ** valori di fusione in conchiglia riportati nella norma UNI EN 1706/2010			

References

- [1] Campbell F.C., Manufacturing technology for aerospace structural materials. Elsevier; 2006.
- [2] Warren A.S., Developments and challenges for aluminium - A Boeing perspective. Mater Forum 2004, 28 pp. 24-31.
- [3] Blanco M.I., The economics of wind energy. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2009, 13, pp. 1372-1382.
- [4] Atkinson H.V., Liu D., (2008) "Microstructural coarsening of semi-solid aluminium alloys" Materials Science and Engineering A, Volume 496, 1-2, 25, pp. 439-446.
- [5] Barnes H., (1997) "Thixotropy - a review", Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 70, pp.1-33.
- [6] Cetin, A., Kalkanli, A., (2009) "Investigation of microporosity formation mechanisms in A356 aluminium alloy castings", International Journal of Microstructure and Materials Properties, Vol. 4, No.3, pp.377-385.
- [7] Curle U. A., Govender G., (2010), "Semi-solid rheocasting of grain refined aluminum alloy 7075", Transaction of nonferrous metals. Society of China 20, pp 832-836.
- [8] Rosso M., Peter I., Villa, R., (2008), "Effects of T5

Tabella 2:
Proprietà tensili
medie dei
campioni rheocast

0,05%. Le anime ceramiche per le pinze sono state prodotte con pressatura a umido.

Questa ricerca consente di ottenere risultati importanti per quanto riguarda proprietà meccaniche e stabilità di forma, e in particolare:

1. resistenza meccanica: come previsto, nel processo semi-solido vengono accettati valori limitati di resistenza alla torsione per evitare la rottura delle anime: per l'applicazione in oggetto è stata sufficiente una resistenza alla torsione di > 12 MPa;
2. stabilità di forma: a causa dell'elevata resistenza alla compressione (>1500 bar) e del modulo di Young adeguato (>8GPa) non sono stati osservati cambiamenti dimensionali.

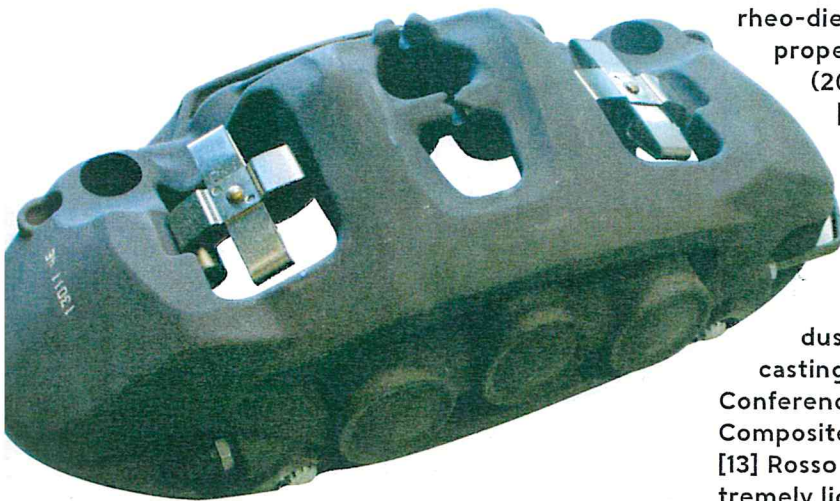
A causa della porosità residua delle anime (<15%), sulla loro superficie è stato applicato un rivestimento protettivo contro l'infiltrazione di metallo. La soluzione ha avuto successo: non è stata osservata alcuna traccia di penetrazione di metallo. Per rimuovere le anime ceramiche dalla fusione (de-carotaggio), è stata scelta l'idro-sabbatura ad alta pressione (HPWJ), un metodo facilmente impiegabile anche nella produzione industriale.

La stazione di de-carotaggio è stata dotata di un sistema di posizionamento e bloccaggio della parte da trattare e di un robot con uno speciale utensile in grado di utilizzare due differenti tipi di ugelli ad alta pressione: uno di questi serve per rimuovere la massa dell'anima, mentre il secondo rimuove il materiale ceramico all'interno dei pistoni. Gli ugelli sono collegati a una pompa ad alta pressione (750 bar) tramite tubi flessibili. Il robot segue un ciclo programmato che indirizza correttamente i getti d'acqua generati dai due ugelli. Con questo set-up, diverse fusioni sono state elaborate con diversi parametri di processo (pressione dell'acqua e tasso di portata, tipo di ugello, ecc.) fino ad ottenere risultati soddisfacenti: i pezzi de-carota-

ti non hanno residui di ceramica sulle superfici interne.

Per verificare l'integrità metallurgica e per individuare e correggere i parametri relativi alla fase di iniezione, è stata effettuata l'analisi radiografica dei componenti prodotti. A seconda della posizione della zona studiata e a causa della forma complessa del componente, in alcuni casi si è osservato uno spessore superiore ai 35 mm, rendendo difficile l'analisi radiografica. Alcune zone risultano schermate o coperte rispetto alle altre. La Figura 3 riporta un'immagine radiografica e rivela l'assenza di difetti nel campione studiato.

Per quanto riguarda i difetti, anche le parti più critiche, valutate mediante ispezione radiografica, sono state sottoposte ad analisi microstrutturale, dopo un'adeguata preparazione metallografica. La microstruttura dei getti "peggiori" rivela la presenza di qualche difetto. In particolare, nella Figura 7a è stato illustrato un particolare tipo di difetto: l'ossido superficiale è piegato in modo da produrre difetti tipo cricche, conosciuti come "bifilms" [15, 16]. Questi sono estremamente sottili e la turbolenza superficiale che causa i bifilms e le bolle ad essi associate si possono sviluppare come riportato nella Figura 4b. Oltre al banco prova di validazione su pezzi solidi per lo screening, sono stati eseguiti ulteriori test di frenatura anche sui pezzi "peggiori" per valutare il comportamento del componente anche in presenza di difetti individuati. I risultati sono stati eccellenti: dopo una radiografia successiva di screening, i difetti presenti sui pezzi "peggiori", precedentemente individuati e misurati, non si erano propagati all'interno dei pezzi dopo oltre 106 cicli di resistenza con fluido ad alta pressione all'interno. Ciò indica un'elevata resistenza a frattura (in termini di fattore di intensificazione degli sforzi K_{IC}) e di conseguenza un'elevata affidabilità del componente. Sulla base dei risulta-



and T6 heat treatments applied to rheocast A356 parts for automotive applications", *Journal of Solid State Phenomena* Vol. 141-143, pp. 237-242.

[9] Rosso M., Peter I., "New frontiers for thixoforming", *International Journal of Microstructure and Materials Properties*, Vol. 8, Issue 1-2, 2013, pp. 113-124

[10] Zhen Z., Ma Qian, Ji S., Fan Z., "The effects of

rheo-diecasting on the integrity and mechanical properties of Mg-6Al-1Zn", *Scripta Materialia* 54 (2006), 207-211, ISSN 1359-6462.

[11] Kaufmann H., Wabusses H., Uggowitzer J., "Aspects of the NRC semi-solid casting technology", *Journal of Metallurgical and processing Technology*, vol. 76, no1-2, pp. 70-75.

[12] Rosso, M., Peter, I., Chiarmetta, G., Gattelli, I., (2010), "Development of industrial components by advanced squeeze casting", *Proceedings of the 11th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites*, Beijing, 16th - 18th September.

[13] Rosso M., Peter I., Chiarmetta G., Gattelli I., "Extremely light weight rheocast components for automotive", *Diffusion and Defect Data Pt.B: Solid State Phenomena* 192-193, 2012, pp. 545-550.

[14] Moschini R., Molina R., "Production of hollow components in high pressure die casting through the use of ceramic cores". HTDC, Vicenza Feb 2012.

[15] Campbell J., *Castings* 2nd edn., pp. 443-452; 2003, Oxford, Butterworth-Heinemann.

[16] Campbell J., *Casting practice*, 2004, Oxford, Butterworth Heinemann.

ti del test di resistenza, si può affermare che la presenza di difetti non influenza negativamente e non compromette in alcun modo le prestazioni delle pinze neanche in condizioni estreme. La speciale microstruttura globulare sembra essere più appropriata di quella dendritica per frenare la propagazione delle cricche, a partire dalle aree danneggiate.

Infine, su campioni sezionati è stata effettuata la prova di trazione statica: la Tabella 2 ne riassume i risultati e riporta anche i requisiti standard (UNI EN 1706/2010) per la lega A357 T6 trattata a caldo per fusione in sabbia e in conchiglia. I valori misurati superano le soglie standard.

Bibliografia

[1] Campbell F.C., *Manufacturing technology for aerospace structural materials*. Elsevier; 2006.

[2] Warren A.S., *Developments and challenges for aluminium - A Boeing perspective*. Mater Forum 2004, 28 pp. 24-31.

[3] Blanco M.I., *The economics of wind energy*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2009, 13, pp. 1372-1382.

[4] Atkinson H.V., Liu D., (2008) "Microstructural coarsening of semi-solid aluminium alloys" *Materials Science and Engineering A*, Volume 496, 1-2, 25, pp. 439-446.

[5] Barnes H., (1997) "Thixotropy - a review", *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 70, pp.1-33.

[6] Cetin, A., Kalkanli, A., (2009) "Investigation of micro-porosity formation mechanisms in A356 aluminium alloy castings", *International Journal of Microstructure and Materials Properties*, Vol. 4, No.3, pp.377-385.

[7] Curle U. A., Govender G., (2010), "Semi-solid rheocasting of grain refined aluminum alloy 7075", *Transaction of nonferrous metals. Society of China* 20, pp 832-836.

[8] Rosso M., Peter I., Villa, R., (2008), "Effects of T5 and T6 heat treatments applied to rheocast A356 parts for automotive applications", *Journal of Solid State Phenomena* Vol. 141-143, pp. 237-242.

[9] Rosso M., Peter I., "New frontiers for thixoforming", *International Journal of Microstructure and Materials Properties*, Vol. 8, Issue 1-2, 2013, pp. 113-124

[10] Zhen Z., Ma Qian, Ji S., Fan Z., "The effects of rheo-diecasting on the integrity and mechanical properties of Mg-6Al-1Zn", *Scripta Materialia* 54 (2006), 207-211, ISSN 1359-6462.

[11] Kaufmann H., Wabusses H., Uggowitzer J., "Aspects of the NRC semi-solid casting technology", *Journal of Metallurgical and processing Technology*, vol. 76, no1-2, pp. 70-75.

[12] Rosso, M., Peter, I., Chiarmetta, G., Gattelli, I., (2010), "Development of industrial components by advanced squeeze casting", *Proceedings of the 11th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites*, Beijing, 16th - 18th September.

[13] Rosso M., Peter I., Chiarmetta G., Gattelli I., "Extremely light weight rheocast components for automotive", *Diffusion and Defect Data Pt.B: Solid State Phenomena* 192-193, 2012, pp. 545-550.

[14] Moschini R., Molina R., "Production of hollow components in high pressure die casting through the use of ceramic cores". HTDC, Vicenza Feb 2012.

[15] Campbell J., *Castings* 2nd edn., pp. 443-452; 2003, Oxford, Butterworth-Heinemann.

[16] Campbell J., *Casting practice*, 2004, Oxford, Butterworth Heinemann.