

Studio della shell zone di billette in lega di alluminio ottenute mediante direct-chill casting con impiego di matrici hot-top innovative

A. Malandruccolo, C. Menapace, F. Canevari

Il processo di *direct-chill* casting (DCC) che impiega lingottiere *hot-top* è una tecnica diffusa per la produzione di leghe di Al. Nella produzione moderna, il focus sul miglioramento della resa del processo produttivo ha spinto i produttori di attrezzature a ridurre al minimo la *shell zone* che si forma durante la solidificazione. La *shell zone* è caratterizzata da una microstruttura fine, da segregazione e da un alto rischio di inclusioni di gas e altri difetti. Questo studio analizza sistematicamente l'influenza dei parametri chiave sulle caratteristiche della *shell zone*. Tra questi: il design del sistema di raffreddamento, la velocità di colata, la posizione della zona di transizione liquido-solido e la geometria della lingottiera. L'obiettivo è stato quello di identificare la combinazione ottimale di parametri per ridurre al minimo lo spessore della *shell zone*, contribuendo allo sviluppo di lingottiere *hot-top* innovative. Le prove di colata sono state condotte in un impianto di produzione industriale utilizzando la lega AW 6082, rilevante dal punto di vista commerciale. La caratterizzazione microstrutturale, effettuata mediante microscopia ottica ed elettronica, ha confermato la velocità di colata come parametro maggiormente influente sulla riduzione dello spessore della *shell zone*. Inoltre, anche le variazioni nella geometria della lingottiera hanno avuto un impatto non trascurabile. Quest'ultimo risultato ha aperto alla considerazione dell'utilizzo di simulazioni termo-fluidodinamiche nelle future indagini relative a questo progetto.

PAROLE CHIAVE: SHELL ZONE, LEGHE DI ALLUMINIO, DIRECT-CHILL CASTING, MICROSEGREGAZIONE, SOLIDIFICAZIONE;

INTRODUZIONE

Le leghe di Al hanno assunto una considerevole importanza nell'ingegneria moderna. Per via del loro processo di produzione primario che impiega l'elettricità, a differenza delle leghe a base Fe, possono essere classificate come relativamente giovani. Come per altri sistemi di leghe, la produzione avviene secondo due vie principali: dal minerale o dal rottame. In entrambi i casi, una volta elaborato il liquido, il passo successivo consiste nel processo di colata. Le leghe di Al possono essere prodotte attraverso processi continui, semicontinui o discontinui. All'inizio del XX secolo si è registrato un aumento della produzione di leghe di Al a causa dell'elevata domanda di mercato. I processi di colata discontinua, come la colata in stampo permanente, mostrarono tutti i loro limiti nel soddisfare la domanda del mercato: solidificazione lenta, scarso trasferimento di calore, struttura a grana grossa, precipitazione di intermetallici con dimensioni considerevoli e relativi problemi durante i processi di

**Alessio Malandruccolo,
Cinzia Menapace**

Dipartimento di Ingegneria Industriale,
Università degli Studi di Trento

Federica Canevari

Almec Tech Srl, Rovereto

laminazione, forgiatura ed estrusione. Questo contesto ha fornito la base per lo sviluppo del *direct-chill casting* (DCC) negli anni '30, prima come processo discontinuo e poi come processo semicontinuo. Nella produzione moderna, il DCC è comunemente utilizzato per produrre leghe lavorabili e prevede di colare il liquido all'interno di una lingottiera inizialmente tappata per consentire la formazione di una parte solida iniziale che sarà poi lasciata avanzare verso il basso a una velocità di colata costante. La formazione della billetta avviene verticalmente fino a una lunghezza massima determinata dalla profondità del pozzo, all'interno del quale è posta l'attrezzatura di

supporto delle billette e che ne determina la velocità di colata [1, 2, 3, 4, 5].

Cercando di semplificare la trattazione, il principio di funzionamento del DCC si basa essenzialmente sulla solidificazione che impiega un processo di raffreddamento in due fasi: primario e secondario. Il raffreddamento primario è quello che si ottiene attraverso il contatto tra la superficie della lingottiera e il liquido, mentre il secondario si realizza quando la superficie appena solidificata viene investita da un getto d'acqua durante la sua discesa (figura 1).

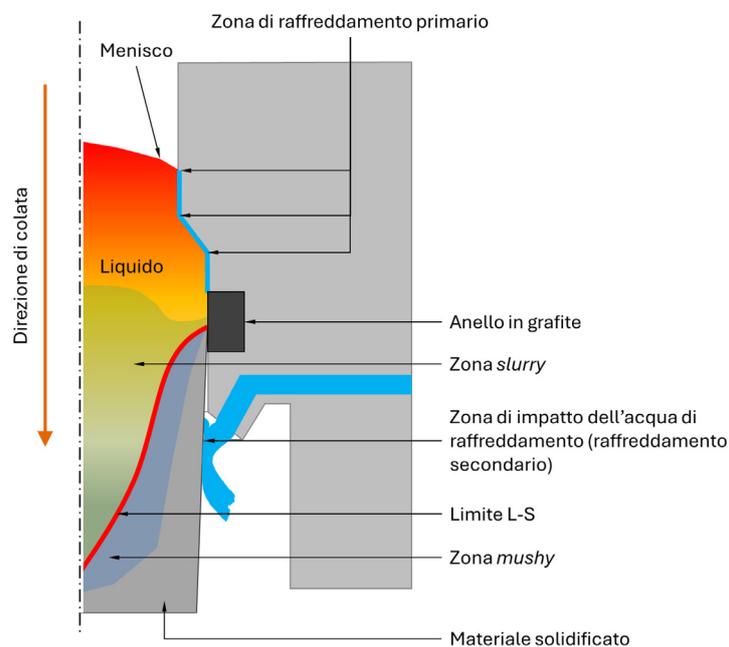


Fig.1 - Schematizzazione del principio di funzionamento della lingottiera per il processo di DCC con struttura generica di una lingottiera hot-top in sezione / *Schematic outline of the working principle of the mold for the DCC process with generic cross-section of a hot-top mold.*

Mentre la parte esterna della lega in via di solidificazione forma la cosiddetta *shell zone* a seguito dell'azione del raffreddamento primario, la parte interna è ancora in fase di solidificazione e quindi parzialmente liquida. L'ulteriore raffreddamento a opera del secondario permette di estendere rapidamente il fronte di solidificazione, mentre la billetta scende al di sotto del bordo inferiore della lingottiera. Attualmente esistono due tipologie di lingottiere utilizzate nei processi di DCC: convenzionali a galleggiante (*conventional floating molds*) e *hot-top*. Tra le due, quella in grado di garantire migliore qualità del prodotto e produttività risulta essere la *hot-top* [2, 3].

Il funzionamento della *hot-top mold* (figura 1) si basa su una lingottiera con la parte superiore che per prima entra in contatto con il liquido in grado di limitare il raffreddamento e rimanere pertanto "calda". Questo permette di solidificare solamente un sottile strato di materiale e di abbassare la posizione limite di transizione liquido-solido fino ad arrivare in prossimità del raffreddamento secondario. Tra il raffreddamento primario e quello secondario è posto un anello di grafite attraverso cui può passare olio oppure una miscela di aria e olio per un migliore controllo della qualità della superficie [6].

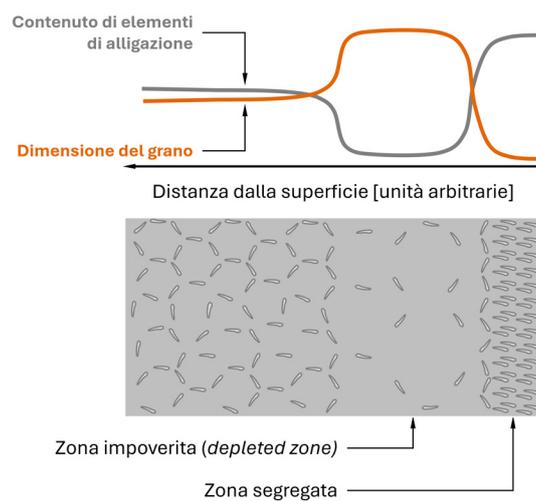


Fig.2 - Schematizzazione di una sezione di materiale solidificato nella zona corticale con evidenza della variazione della dimensione del grano e del livello di segregazione / *Schematic of a section of solidified material near the surface with evidence of variation in grain size and level of segregation.*

La *shell zone* (anche detta zona corticale) può essere definita come la parte del materiale vicino alla superficie che si solidifica per prima al contatto con le pareti della lingottiera. Essa è caratterizzata da una microstruttura fine nella regione più esterna, risultante dal rapido raffreddamento e dalla segregazione degli elementi di alligazione. A questo segue tipicamente una zona impoverita di elementi di alligazione e con grani di dimensioni maggiori. Spostandosi verso il centro del prodotto di solidificazione, la dimensione della microstruttura diventa più fine e la segregazione si riduce (figura 2). Come risultato di queste caratteristiche, la *shell zone* ha proprietà diverse dal resto del materiale. Ciò ha anche effetti a livello macroscopico, portando a una diminuzione della resistenza alla corrosione e a variazioni nelle proprietà tecnologiche [2, 7].

I miglioramenti per quanto concerne la tecnologia *hot-top* si sono storicamente focalizzati sul raffreddamento primario al fine di minimizzare l'asportazione di calore, senza tuttavia evitare la solidificazione. Nello specifico, l'obiettivo è sempre stato quello di utilizzare il raffreddamento primario per formare una pelle solida il più possibile limitata nello spessore.

La parte iniziale del lavoro di ricerca in cui si colloca questo studio ha avuto come oggetto l'individuazione dei parametri maggiormente influenzanti sviluppo ed estensione della *shell zone* al fine di poter giungere alla progettazione di lingottiere di tipo *hot-top* innovative in grado di minimizzare lo spessore della zona corticale e di garantire

una maggiore qualità del materiale prodotto. I fattori inizialmente individuati risultano essere quelli rappresentati all'interno della figura 3. Alla luce del fatto che i dati di letteratura spesso si riferiscono a condizioni di processo molto differenti rispetto a quelle reali dal punto di vista delle attrezzature utilizzate e dei semilavorati prodotti, lo scopo della parte iniziale del progetto di ricerca è stato di rilevare l'effettiva incidenza dei parametri di processo sul design attuale delle lingottiere *hot-top* al fine di tracciare una linea di partenza per lo sviluppo delle nuove attrezzature.

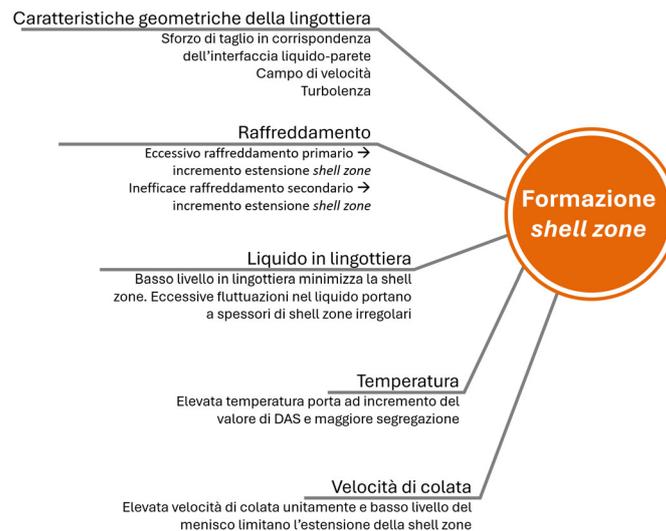


Fig.3 - Schematizzazione di alcuni dei parametri che influenzano formazione ed estensione della *shell zone* unitamente al loro effetto [1, 2, 3, 4, 6] / *Schematic of some of the parameters that influence formation and extension of the shell zone together with their effect [1, 2, 3, 4, 6].*

MATERIALI E METODI

La lega scelta per l'esecuzione dei test è la EN AW 6082, la cui composizione chimica è fornita in tabella 1. In totale sono state prodotte tre colate in due prove utilizzando una placca da sei posizioni come raffigurato in figura 4. La placca è stata alimentata dal forno dell'impianto attraverso il sistema di canalizzazione e trasporto dell'alluminio

liquido con una temperatura del liquido in forno sempre compresa tra 718°C e 740°C per tutte le colate. La temperatura della lega liquida in lingottiera è sempre stata compresa tra 650°C e 660°C. Il diametro scelto per le billette prodotte è stato quello di 280 mm, un formato comune sul mercato.

Tab. 1 - Composizione chimica della lega EN AW 6082 in accordo con UNI EN 573-3 / *Chemical composition of EN AW 6082 alloy in agreement with UNI EN 573-3.*

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Altri	Al
Max	1.3	0.5	0.1	1.0	1.2	0.25	0.2	0.1	0.15	resto
Max	1.3	0.5	0.1	1.0	1.2	0.25	0.2	0.1	0.15	resto

Come riportato all'interno della figura 4, la configurazione della placca di colata utilizzata ha previsto l'assegnazione delle posizioni 5 e 6 alle prove, la 3 e la 4 alla produzione standard e per garantire una portata costante dal forno fusorio; mentre la 1 e la 2 sono rimaste chiuse e hanno quindi avuto la funzione di serbatoio di compensazione di lega liquida per la durata del processo di colata. Le due prove effettuate hanno avuto come obiettivo la verifica dell'influenza di alcuni dei parametri riportati all'interno della figura 3, più precisamente:

- design e azione del circuito di raffreddamento secondario;

- velocità di colata;
- posizione del limite di transizione liquido-solido;
- influenza della geometria della lingottiera sull'azione di raffreddamento operata dal primario.

I parametri valutati al fine di giudicare l'esito delle prove sono stati principalmente due: qualità della superficie delle billette prodotte ed estensione della *shell zone*.

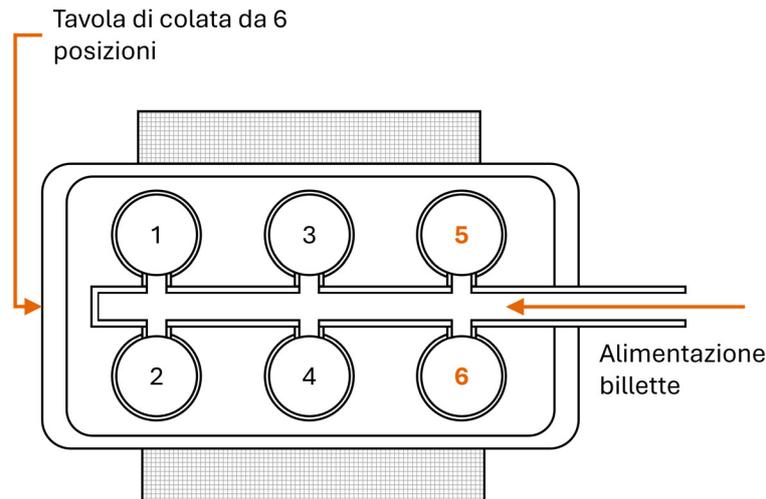


Fig.4 - Schematizzazione della configurazione della placca di colata utilizzata per le prove. Si noti che le posizioni utilizzate sono la 5 e la 6, mentre le posizioni 1 e 2 sono rimaste chiuse / *Schematic of the casting plate configuration used for the trials. Note that the positions used are 5 and 6, while positions 1 and 2 remained closed.*

La prima prova ha previsto l'impiego di quattro diverse lingottiere di tipo *hot-top*, le cui differenze sono riassun-

te all'interno della figura 5.

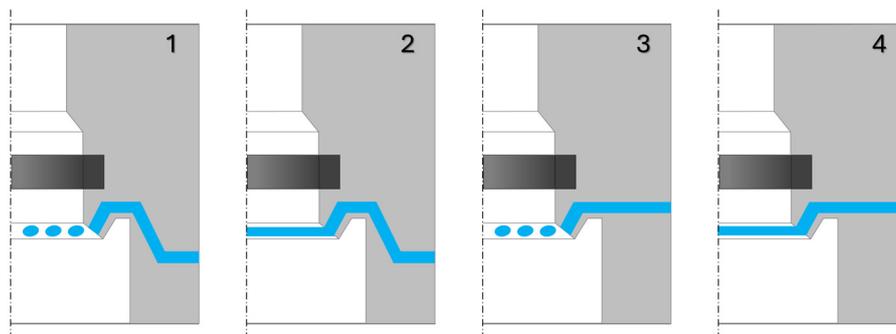


Fig.5 - Schematizzazione delle differenze tra le quattro lingottiere impiegate durante la prova 1. 1) circuito di raffreddamento risalente dal basso con nebulizzazione; 2) circuito di raffreddamento risalente dal basso con lama d'acqua; 3) circuito di raffreddamento verso l'alto con nebulizzazione; 4) circuito di raffreddamento verso l'alto con lama d'acqua / *Schematic of the differences among the four molds used during trial 1. 1) cooling circuit rising from below with nebulization; 2) cooling circuit rising from below with water blade; 3) cooling circuit rising upwards with nebulization; 4) cooling circuit rising upwards with water blade.*

Per la prova 1 sono state effettuate due colate e, con riferimento alla figura 4, la sequenza di impiego delle quattro lingottiere è riassunta all'interno della tabella 2. Per ogni colata sono state prodotte billette impiegando tre differenti velocità di colata. La velocità di base è stata $v_1 = 80$ mm/min, mentre gli altri valori hanno visto un incremen-

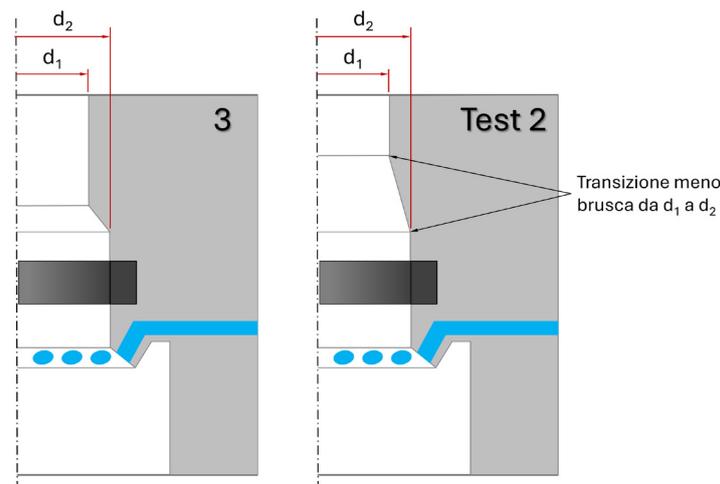
to con $v_2 = v_1 + 12.5\%$ e $v_3 = v_1 + 37.5$. La portata dell'acqua di raffreddamento è rimasta invariata per tutte le configurazioni di prova.

Tab.2 - Configurazione di prova per il test 1 / *Trial 1 configuration.*

Colata	Posizione	Lingottiera	Raffreddamento secondario	Geometria del circuito secondario
1	5	1	Nebulizzazione	Risalente dal basso della lingottiera
1	6	2	Lama d'acqua	Risalente dal basso della lingottiera
2	5	3	Nebulizzazione	Verso la parte alta della lingottiera
2	6	4	Lama d'acqua	Verso la parte alta della lingottiera

La prova 2 ha previsto l'impiego delle impostazioni e della configurazione lingottiera-raffreddamento che avevano ottenuto i migliori risultati durante la prova 1, aggiungendo una variazione nella geometria della lingottiera per quanto riguarda il raffreddamento primario al fine di variare le condizioni termo-fluidodinamiche del liquido con l'obiettivo di limitare la crescita della *shell zone* (figura 6). Il diametro dell'ingresso d_1 è lo stesso per entrambe

le configurazioni, così come il diametro dell'uscita d_2 . La differenza tra la configurazione 3 e quella del test 2 risiede nella forma del refrattario, ovvero nel profilo che passa da d_1 a d_2 . La geometria modificata del test 2 presenta una transizione più graduale nel passaggio dal diametro dell'ingresso del liquido al diametro della sezione di uscita.

**Fig.6** - Variazione nella geometria del raffreddamento primario per la lingottiera della seconda prova / *Variation in the geometry of the primary cooling for the mold employed in the second trial.*

Ricordando la definizione di portata massica, si presume che la lega liquida subisca una diminuzione costante della velocità su una distanza limitata nella direzione di colata (configurazione 3 in figura 6) a causa dell'improvviso aumento dell'area della sezione trasversale della cavità interna. Di conseguenza, si ipotizza che lo sforzo di taglio subito dal liquido all'interfaccia con le pareti diminuisca di conseguenza, raggiungendo il minimo per il diametro corrente dopo un breve percorso nella lingottiera. Alcuni studi relativi al movimento del liquido durante i processi

di DCC hanno dimostrato come variazioni di velocità nel liquido, e quindi dello sforzo di taglio subito dal liquido a contatto con le pareti della lingottiera, siano in grado di modificare la microstruttura e il processo di solidificazione riducendo la SDAS (*secondary dendrite arm spacing*), effetto unanimemente riconosciuto come positivo nella riduzione della segregazione [8]. Inoltre, un aumento dello sforzo di taglio favorirebbe un regime di moto più turbolento nel liquido con un incremento della velocità di estrazione del calore che si traduce in un gradiente di

temperatura più ampio sul fronte di solidificazione, favorendo così una microstruttura più fine e una microsegregazione ridotta [9, 10].

Per quanto riguarda la caratterizzazione del materiale, gli esami di microscopia ottica hanno previsto l'uso di un microscopio Zeiss con camera Leica DC300 (Leica Microsystems GmbH, Wetzlar, Germania), mentre le analisi SEM hanno previsto l'utilizzo di un microscopio elettronico JSM IT300LW (JEOL Ltd, Tokyo, Giappone) equipaggiato con EDXS Quantax (Bruker Corp., Billerica, MA, USA) e detector XFLASH 630M (Bruker Corp., Billerica, MA, USA).

RISULTATI E DISCUSSIONE

I risultati della prova 1 hanno evidenziato forti differenze per quanto riguarda la qualità superficiale delle billette prodotte. Nello specifico, per entrambe le colate la configurazione di raffreddamento con lama d'acqua ha causato la formazione di una superficie estremamente irregolare, tanto da risultare non conforme agli standard produttivi per prodotti da estrusione. Inoltre, l'esame macrografico ha evidenziato un'estensione della *shell zone* ampiamente sopra i 3 mm in media. In aggiunta a questo, l'andamento dello spessore della *shell zone* evidenziato dall'esame macrografico è risultato estremamente irregolare. Si ritiene che l'azione di raffreddamento della lama d'acqua delle lingottiere 2 e 4 abbia provocato una condizione

ascrivibile al fenomeno di liquazione del materiale, con conseguente formazione della superficie non conforme [2]. Riguardo al design del raffreddamento secondario, sembrerebbe che un percorso più breve delle canalizzazioni interne alla lingottiera come quello della numero 3 comporti risultati migliori riducendo l'ampiezza della *shell zone*. Si suppone che ciò possa essere provocato da variazioni nello scambio termico tra il circuito e i componenti della lingottiera; tuttavia, delle conclusioni certe in questa fase potrebbero avere puro carattere speculativo. Sarà necessario analizzare il fenomeno con maggiore dettaglio in futuro, avvalendosi di simulazioni dei flussi di calore e delle condizioni di scambio termico nella struttura interna della lingottiera.

Le billette prodotte dalle lingottiere 1 e 3 hanno presentato una superficie in linea con la qualità del prodotto standard per la successiva estrusione con una tendenza crescente a formare pieghe fredde all'aumentare della velocità di colata. La billetta prodotta dalla lingottiera 1 con velocità di colata v_3 è stata scartata in quanto caratterizzata da superficie non conforme a causa delle pieghe fredde. Insieme all'incremento della velocità di colata si è imposto il processo al fine di ottenere un abbassamento del menisco e una conseguente riduzione dell'estensione della *shell zone* come riportato nei risultati in tabella 3 e figura 8.

Tab.3 - Risultati del primo test / *First trial results*.

Colata	Posizione	Lingottiera	v di colata [mm/min]	Shell zone [µm]	Depleted zone [µm]	Totale zona disomogenea [µm]
1	5	1	v1	840,32	237,64	1077,96
1	5	1	v1 +12.5%	815,58	102,47	918,04
1	5	1	v1 +37.5%	Peggioramento eccessivo della qualità superficiale		
2	5	3	v1	891,40	153,76	1045,15
2	5	3	v1 +12.5%	581,97	133,20	715,17
2	5	3	v1 +37.5%	413,94	Non rilevabile	413,94

I risultati riportati all'interno della tabella 3 evidenziano come la lingottiera 3 sia riuscita a garantire una maggiore riduzione dell'estensione della *shell zone* a parità di incremento di velocità di colata nel passare dal valore base al primo incremento del 12.5%. Si ritiene che il design

delle canalizzazioni interne del raffreddamento secondario abbia giocato un ruolo nella determinazione del risultato, causando una differente asportazione di calore dal materiale. Alla luce dei risultati riportati in tabella 3, la configurazione che ha causato la maggiore riduzione della

shell zone in funzione dell'aumento della velocità di colata è stata quella che ha impiegato la lingottiera numero 3. L'esame micrografico del materiale è rappresentato in figura 7. Per quanto riguarda i risultati ottenuti dalla lingottiera 3 con la velocità di colata più elevata, come evidenziato dalla figura 7, la *depleted zone* non è chiaramente distinguibile. La verifica dell'influenza della velocità di colata si è resa necessaria perché da una parte è sicuramente vero che un valore maggiore riduce l'estensione della *shell zone*, ma dall'altra è altrettanto vero che a parità di incremento percentuale ci saranno risultati differenti in funzione del design della lingottiera e della dimensione della billetta, a parità di tutti gli altri parametri (i.e., lega, temperatura del forno, etc.). In figura 7 è riportata anche la variazione della posizione della transizione liquido-solido misurata durante il processo in funzione della velocità di colata e, in accordo con i dati di letteratura, un abbassamento ha comportato una riduzione dell'estensione della *shell zone*. Come si può vedere, lo spostamento verso il

basso del limite L-S ha portato quindi a una riduzione della distanza dello stesso dalla parte terminale dell'anello di grafite e ha aumentato l'estensione del contatto con esso. L'anello di grafite ha una conducibilità termica di praticamente quattro ordini di grandezza maggiore rispetto al refrattario. Lo spostamento verso il basso del limite L-S dovrebbe aver contribuito a creare una condizione di solidificazione ritardata e caratterizzata da maggiore velocità di asportazione di calore causata dalla combinazione tra l'estrazione di calore a opera della grafite e dalla maggior vicinanza all'azione più drastica dell'acqua del raffreddamento secondario. In tali condizioni, lo spessore della *shell zone* dovrebbe quindi minimizzarsi. Infine, per poter garantire un risultato costante durante tutto il processo di colata, le fluttuazioni nella portata di liquido in lingottiera devono essere minimizzate in modo da garantire un livello costante del menisco e del limite L-S durante tutto il processo.

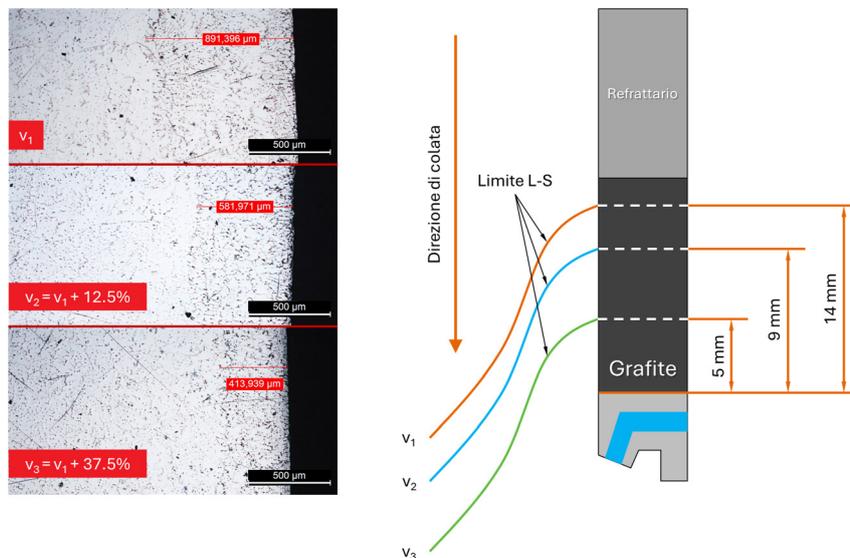


Fig.7 - Posizione del limite L-S in arancio, azzurro e verde in funzione della velocità di colata e micrografie risultanti della zona sub-superficiale delle billette prodotte con lingottiera numero 3. Il senso di osservazione della superficie è ortogonale alla sezione trasversale circolare della billetta e coincide con la direzione di colata / *L-S boundary position in orange, blue and green as a function of casting speed and resulting micrographs of the sub-surface zone of billets produced with mold number 3. The direction of observation of the surface is orthogonal to the circular cross-section of the billet and corresponds to the casting direction.*

Come evidenziato dalle micrografie presenti in figura 7, all'interno della *shell zone* è presente una frazione volumetrica non trascurabile di seconde fasi, corrispondente agli intermetallici formati in fase di solidificazione in lu-

ogo dell'arricchimento del liquido interdendritico causato dalla segregazione di elementi con coefficiente di partizione inferiore a 1 come Si, Fe, Mg e Mn, in maniera coerente con una struttura di tipo *as-cast* [11]. In figura 8 sono

riportate le mappe elementari di una colonia di precipitati rappresentativa di quelli presenti all'interno della *shell zone*. Dalla rappresentazione semi-quantitativa offerta in figura 8 si nota come siano presenti varie composizio-

ni che, in accordo con quanto riportato dalla letteratura, possono essere ricondotte a Mg_2Si , $\alpha-Al(FeMn)Si$ e stechiometrie ibride con differenti morfologie [12, 13].

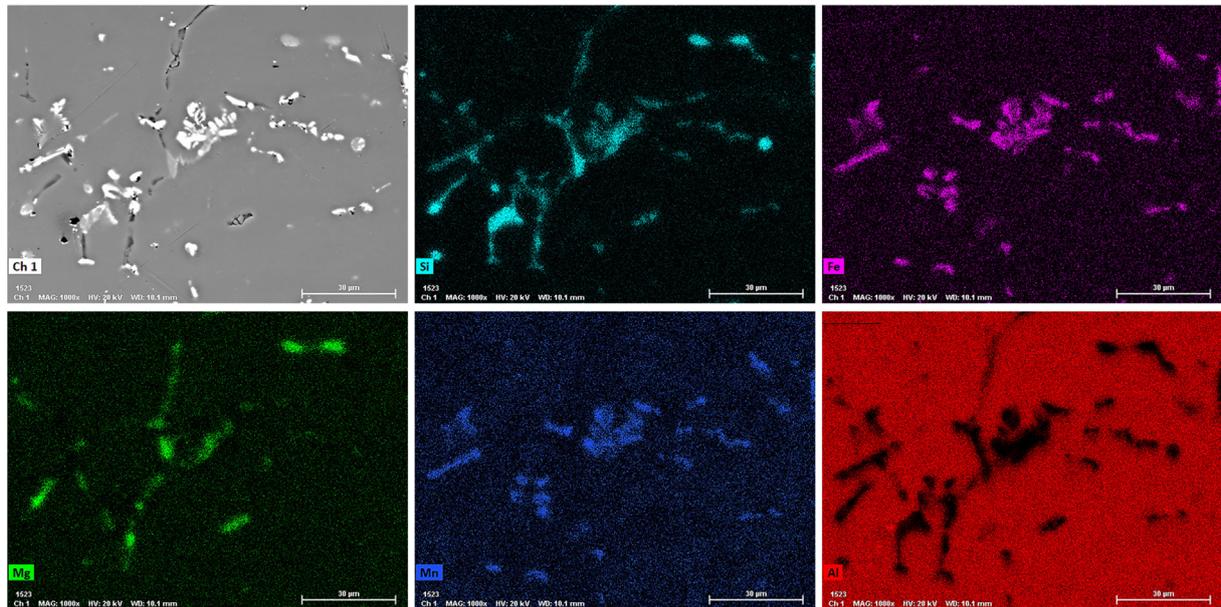


Fig.8 - Micrografia SEM in modalità BSE e mappe elementari EDXS di una colonia di intermetallici rilevata all'interno della *shell zone* / *BSE - SEM micrograph and EDXS elementary maps of a colony of intermetallics detected within the shell zone.*

La prova 2 ha previsto la replica delle condizioni che hanno portato a ottenere i risultati riportati in figura 7, con l'aggiunta delle modifiche geometriche esplicitate in fi-

gura 6. Il risultato del test ha evidenziato una variazione sostanziale nello spessore della *shell zone*, che risulta ora più che dimezzata come rappresentato in figura 9.

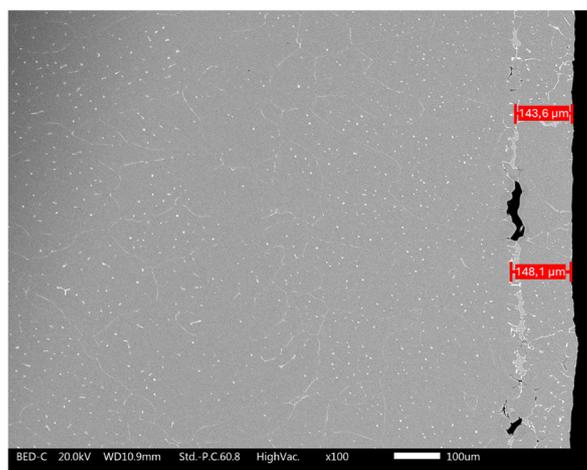


Fig.9 - Micrografia SEM in modalità BSE della zona sub-corticale in corrispondenza della *shell zone* del materiale prodotto durante la prova 2 con stessi parametri del miglior risultato del test 1 e geometria modificata della lingottiera / *BSE-SEM micrograph of the sub-cortical layer corresponding to the shell zone of the material produced during test 2 with the same parameters of the best result of test 1 and modified ingot mold geometry.*

In questo caso l'estensione è inferiore a 150 μm e anche la morfologia risulta differente, mostrando un allineamento/interconnessione di intermetallici al limite dell'estensione della *shell zone* verso il centro della billetta. Inoltre, alcune cavità probabilmente causate dal ritiro in fase di solidificazione sono presenti anche in corrispondenza dell'allineamento di intermetallici al limite della *shell zone*. Anche la morfologia e la distribuzione delle seconde fasi rilevate nella *shell zone* e al suo limite di estensione

risultano profondamente differenti da quanto riportato in figura 7 e figura 8. La figura 10 mostra intermetallici con morfologia principale di tipo script cinese, apparentemente costituiti in maniera preponderante da Al, Si e Fe. In accordo con la rappresentazione semi-quantitativa offerta in figura 10, e in funzione di quanto riportato in letteratura, la stechiometria più probabile ipotizzabile in questo caso risulta essere $\beta\text{-Al}_3\text{Fe}_2\text{Si}$ [14].

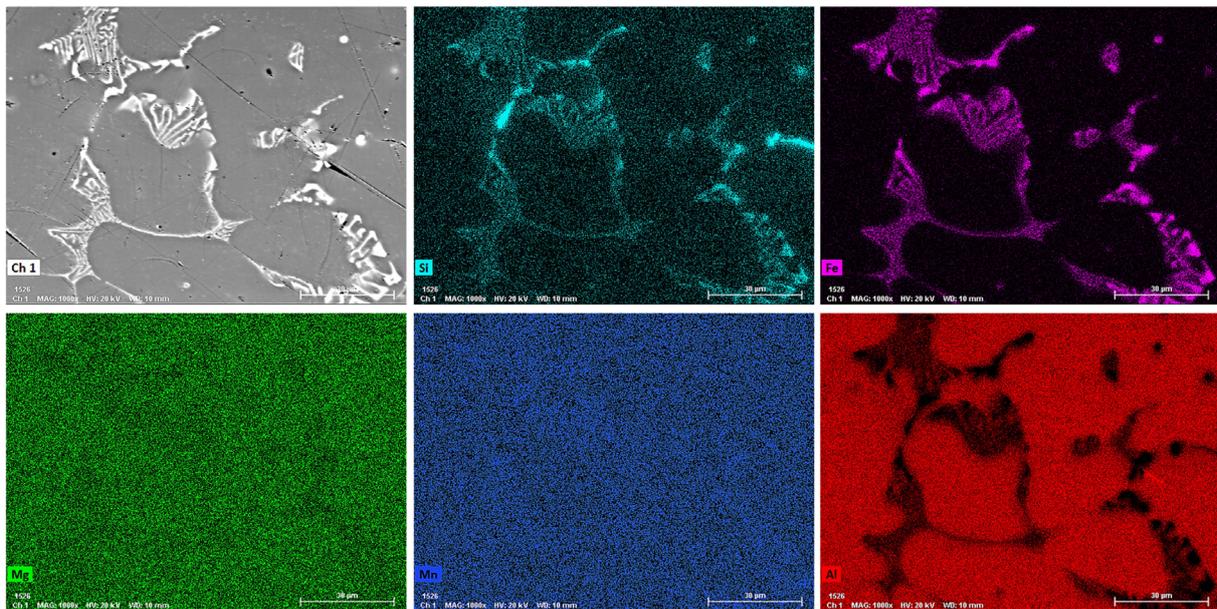


Fig.10 - Micrografia SEM in modalità BSE e mappe elementari EDXS degli intermetallici rilevata al limite dell'estensione della *shell zone* del materiale prodotto durante la prova 2 / *EDXS elemental maps of intermetallics detected at the boundary of the shell zone extension of the material produced during test 2.*

I risultati ottenuti dal test 2 sono probabilmente ascrivibili alle mutate condizioni dinamiche del liquido all'interno della lingottiera durante il processo di colata. Come detto in precedenza, una transizione più graduale dal diametro di ingresso a quello di uscita dovrebbe avere influenza sul campo di velocità nel liquido e sullo sforzo di taglio percepito dallo stesso nello strato a contatto con le pareti della lingottiera. A differenza della configurazione del test 1, quella del test 2 dovrebbe aver provocato un abbassamento graduale dello sforzo di taglio e non un suo brusco calo. Di conseguenza, si suppone che questa situazione abbia creato delle condizioni di rimescolamento all'interfaccia con la lingottiera meno favorevoli alla crescita dendritica e alla segregazione in maniera simile, ma con le opportune proporzioni, a quanto avviene nel

caso dell'applicazione di *stirring* elettromagnetico. Questa ipotesi, tuttavia, è basata per ora sulla teoria relativa alla dinamica dei fluidi e necessiterebbe di maggiore indagine avvalendosi di una combinazione tra simulazione termo-fluido dinamica e validazione sperimentale in successivi test di colata.

Conclusioni

L'evoluzione della *shell zone* di billette in lega di alluminio AW 6082 prodotte con il processo DCC è stata studiata concentrandosi su come le variazioni dei fattori che influenzano il processo determinino le sue caratteristiche. Nello specifico, sono state valutate l'efficacia e l'influenza del design del raffreddamento secondario in funzione della qualità della superficie della billetta e dello spessore

ottenuto della *shell zone*. L'influenza della velocità di colata è stata analizzata producendo billette con tre incrementi discreti. In conseguenza di ciò si sono state valutate la posizione della zona di transizione liquido-solido e la sua correlazione con l'estensione della *shell zone*. Infine, dopo aver determinato la combinazione ottimale di parametri di progettazione e produzione, è stata valutata una modifica della geometria del refrattario. Nelle stesse condizioni e con gli stessi parametri di processo, si è ipotizzato che questa modifica influenzasse il movimento del liquido durante il processo di colata. Le conclusioni principali possono essere riassunte come segue:

- Il getto d'acqua frazionato del raffreddamento secondario si è dimostrato più efficace. Inoltre, sembra che un percorso più breve e diretto possa fornire risultati migliori. Per valutare le ragioni alla base di questa osservazione, è possibile ricorrere a una simulazione termica del flusso di calore nello stampo.
- Come previsto dai dati della letteratura, l'aumento della velocità di colata porta a una diminuzione dello spessore della *shell zone*. Tuttavia, è necessario prestare attenzione alla qualità della superficie e al possibile sviluppo di difetti superficiali.
- Quando la zona di transizione liquido-solido è più vicina al confine inferiore dell'anello di grafite, la *shell zone* risultante ha uno spessore inferiore.
- A parametri di processo invariati, una modifica della

geometria del refrattario influenza lo spessore della *shell zone*. In particolare, una transizione più graduale tra i diametri di ingresso e di uscita ha portato a una riduzione della sua estensione; sebbene la qualità della superficie della billetta sia leggermente peggiorata, rimane comunque accettabile. Questo risultato sembra essere dovuto a una variazione dello sforzo di taglio nel liquido, causata da una diversa variazione della velocità dello stesso. Secondo la letteratura, ciò può avere effetti positivi nel limitare i fenomeni di segregazione.

- Oltre alla variazione dello spessore della *shell zone*, la modifica geometrica ha probabilmente influenzato il movimento del liquido, che a sua volta ha influenzato la segregazione. Una conseguenza diretta di ciò sembra essere la variazione della morfologia e del tipo di intermetallici rilevati.
- L'ottimizzazione dei parametri di processo e della geometria dello stampo per la riduzione dello spessore della *shell zone* richiede un'analisi più approfondita con uno studio termo-fluidodinamico. In questo contesto, nelle ricerche future saranno impiegate simulazioni CFD, unitamente a validazione sperimentale, per stabilire correlazioni più affidabili tra i risultati ottenuti e le relative cause.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Bayat N, Carlberg T. Surface Structure Formation in Direct Chill (DC) Casting of Al Alloys. JOM. 2014; 66(5): 700-10 <https://doi.org/10.1007/s11837-014-0950-y>
- [2] Grandfield J, et al. Direct-Chill Casting of Light Alloys: Science and Technology. Hoboken; New Jersey, USA: Wiley-TMS; 2013 DOI:10.1002/9781118690734
- [3] Leonelli A, et al. Analisi della shell zone di placche in leghe di alluminio ottenute mediante colata semi continua. La Metallurgia Italiana. 2021; 113(1): 6-12
- [4] ASM International. ASM Handbook Volume 15 – Casting. Materials Park; Ohio, USA: ASM International; 2008
- [5] Gialanella S, Malandrucolo A. Aerospace Alloys. Cham; Switzerland: Springer Nature Switzerland AG; 2020
- [6] Eskin D G. Physical Metallurgy of Direct Chill Casting of Aluminum Alloys. Broken Sound Parkway NW; Boca Raton: CRC Press; 2008
- [7] Carlberg T, et al. Surface Segregation and Surface Defect Formation During Aluminum Billet Casting. Transaction of the Indian Institute of Metals. 2015; 68(6): 1065-1069 <https://doi.org/10.1007/s12666-015-0647-0>
- [8] Wang R et al. Effect of Temperature Field on the Porosity and Mechanical Properties of 2024 Aluminum Alloy prepared by Direct Chill Casting with Melt Shearing. Journal of Materials Processing Technologies.2022; 307: 117687 <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2022.117687>
- [9] Lebon B et al. Numerical modelling of melt-conditioned direct-chill casting. Applied Mathematical Modelling. 2020; 77: 1310-1330 <https://doi.org/10.1016/j.apm.2019.08.032>

- [10] Wagstaff S, Allanore A. Minimization of Macroseggregation in DC Cast Ingots Through Jet Processing. Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science. 2016; 47 (5): 3132-3138 <https://doi.org/10.1007/s11663-016-0718-6>
- [11] Cahn R W, Haasen P. Physical Metallurgy 4th edn. North Holland; 1996
- [12] Kumar S et al. Evolution of Fe bearing Intermetallics during DC Casting and Homogenization of Al-Mg-Si Al Alloy. Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science. 2016; 47 (6): 3000-3014 <https://doi.org/10.1007/s11661-016-3451-5>
- [13] Mrówka-Nowotnik G et al. Intermetallic Phase Particles in 6082 Aluminium Alloy. Archives of Materials Science and Engineering. 2007; 28 (2): 69-76
- [14] Khan M H et al. Effects of Fe, Mn, Chemical Grain Refinement and Cooling Rate on the Evolution of Fe Intermetallics in a Model 6082 Al-alloy. Intermetallics. 2021; 132: 107132 <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2021.107132>

Study of the shell zone of aluminum alloy billets obtained by direct-chill casting employing innovative hot-top molds

The direct-chill casting (DCC) process with hot-top molds is a widespread technique for the production of Al alloys. In modern manufacturing, the emphasis on improving process yield has driven equipment manufacturers to minimize the *shell zone* that forms during the solidification process. The *shell zone* is characterized by a fine microstructure, segregation, and a high risk of gas inclusions and other defects. This study systematically investigates the influence of several key parameters on the characteristics of the *shell zone*. In particular, the design of the cooling system, casting speed, the position of the liquid-solid transition zone, and mold geometry, were investigated. The aim was to identify the optimal combination of parameters for minimizing the *shell zone's* thickness, thereby contributing to the development of innovative hot-top molds. Casting tests were conducted in an industrial production plant using the AW 6082 alloy. Microstructural characterization, performed with optical and electron microscopy, confirmed that casting speed is the most influential parameter for reducing the *shell zone's* thickness. Furthermore, variations in mold geometry also had a significant impact. This latter finding highlights the potential for using thermo-fluid dynamic simulations in future investigations related to this project.

KEYWORDS: SHELL ZONE, ALUMINUM ALLOYS, DIRECT-CHILL CASTING, MICROSEGREGATION, SOLIDIFICATION;

TORNA ALL'INDICE >