

Utilizzo di un sistema di ispezione ottica automatica atto al rilevamento dei difetti di colata continua basato su algoritmi di Machine Learning per l'analisi dell'incidenza delle marche di oscillazione su bramme di acciaio inossidabile austenitico AISI 316L e 316LI

A. F. Ciuffini, F. Di Giovanni, D. Mombelli

La colata continua è attualmente il processo principale per la solidificazione dell'acciaio e si è affermata grazie all'elevata produttività, alla qualità metallurgica del prodotto e all'elevato grado di automazione che la contraddistingue. Tuttavia, come tutti i processi industriali, soffre della genesi di alcuni difetti tipici che possono compromettere l'integrità strutturale dei semilavorati oltre che inficiare la qualità del prodotto. Per questo motivo sono stati messi a punto sistemi di ispezione automatica delle bramme capaci di monitorare la superficie dei semilavorati di colata continua al fine di limitare la deformazione plastica e le successive lavorazioni di prodotti con difettosità critiche e/o pericolose. Sfruttando le potenzialità del sistema di ispezione installato su una delle linee di colata dell'acciaieria di Acciai Speciali Terni S.p.A., è stata analizzata l'incidenza delle marche di oscillazione presenti su bramme di acciaio inossidabile austenitico AISI 316L e 316LI al fine di correlarne distribuzione e profondità ai parametri di processo. Dall'analisi è emerso che la velocità di colata è un parametro critico che influenza proporzionalmente la distribuzione delle marche lungo la bramma. L'analisi ha messo in luce una minore lubrificazione degli spigoli aumentando frequenza e profondità delle marche di oscillazione in questa posizione, soprattutto sull'estradosso a causa del peso del semilavorato stesso. L'occorrenza preferenziale di tale difettosità su un lato delle bramme è associata a peculiarità intrinseche degli impianti complessi (ad esempio leggeri disallineamenti). La concentrazione di azoto, diversa per i due acciai analizzati, concorre a modificare il comportamento sugli spigoli. I risultati hanno evidenziato che nelle bramme di transizione (avvio e chiusura colata) il 316L presenta una incidenza di marche di spigolo maggiore del 316LI, mentre la tendenza si inverte per le bramme centrali della colata, per le quali, la maggior disponibilità di azoto del 316L aumenta la viscosità cinematica della polvere di colata, migliorando la lubrificazione.

PAROLE CHIAVE: COLATA CONTINUA, ACCIAI INOSSIDABILI, SISTEMI OTTICI PER RILEVAMENTO AUTOMATICO DIFETTI, MARCHE DI OSCILLAZIONE;

INTRODUZIONE

Il processo di solidificazione in colata continua copre attualmente il 90-95% della produzione industriale di acciaio e la totalità dei semilavorati [1]. L'affermazione di tale processo a discapito della colata in lingotto deriva principalmente dalla possibilità di ridurre il numero degli stadi del ciclo di produzione e lavorazione dell'acciaio e soprattutto di ridurre il consumo energetico legato al riscaldamento dei semilavorati. Questo si accompagna ad un

Andrea Francesco Ciuffini

Acciai Speciali Terni, Viale Benedetto Brin 218, 05100 Terni

Federica Di Giovanni, Davide Mombelli

Politecnico di Milano, Dipartimento di Meccanica, Via La Masa 1,
20156 Milano

aumento della produttività dell'impianto e alla possibilità di colare in sequenza il contenuto di più siviere, con una conseguente riduzione dei costi di esercizio.

La colata continua permette di ottenere semilavorati con una lunghezza teorica infinita, con sezione e forma appropriate per la diretta utilizzazione da parte dei treni di laminazione, senza dover procedere alle operazioni preliminari di sbazzatura [2].

L'impianto inoltre è altamente automatizzato, ciò comporta una riduzione dell'incidenza della manodopera essendo richiesti soltanto tecnici nelle sale di controllo. Il processo in continuo permette inoltre di ottenere una struttura a grano più fine ed un dendritismo colonnare meno pronunciato a causa del rapido raffreddamento a cui è sottoposto, con conseguente miglioramento delle proprietà meccaniche del prodotto.

Il cuore dell'impianto della macchina di colata continuamente è indubbiamente la lingottiera, responsabile della formazione della prima pelle solida dell'acciaio in transito e del conferimento della geometria della sezione del semilavorato. La corretta gestione del flusso termico in lingottiera è fondamentale per garantire una qualità ottimale delle bramme e può essere regolato attraverso la polvere di colata. Il processo di solidificazione e il flusso di metallo liquido nella lingottiera hanno un impatto decisivo sulla formazione di difetti e cricche, sia all'interno che sulla superficie della bramma stessa [3].

I fattori che influenzano lo scambio termico tra l'acciaio e la lingottiera sono:

- la temperatura di colata: se elevata porta alla formazione di una pelle troppo sottile;
- la composizione chimica dell'acciaio: Al, Mn, P, S favoriscono lo scambio termico; C < 0.20% lo peggiora;
- l'intensità del raffreddamento primario: portate d'acqua eccessive causano un brusco raffreddamento dell'acciaio. Ne consegue che la velocità di raffreddamento genera un rapido ritiro della barra e un distacco prematuro dalla lingottiera e quindi una diminuzione dell'efficienza degli scambi termici;
- la lubrificazione della lingottiera: se effettuata con olio favorisce gli scambi termici per mezzo di fenomeni di "cracking" dell'olio stesso.

Il guscio di acciaio solidificato continua a ricevere ca-

lore dal cuore liquido e durante la discesa il battente ferrostatico cresce progressivamente, portando la pelle solida a deformarsi fino a ritornare in contatto con le pareti della lingottiera. Il comportamento della barra in solidificazione, insieme alla contrazione termica, genera dei vuoti all'interfaccia tra acciaio e lingottiera, che vengono riempiti dal lubrificante e dai gas liberati dalla sua decomposizione [4]. Il movimento oscillatorio della lingottiera (tipicamente con andamento sinusoidale), adottato per evitare incollamenti e garantire uno scorrimento uniforme della barra, ha la peculiarità di avere una velocità di discesa maggiore rispetto alla velocità di colaggio (negative strip time - NST). Quest'ultimo parametro ha un'influenza diretta sulla qualità del semilavorato: in generale, tempi più lunghi portano alla formazione di marche di oscillazione più profonde ma migliorano la lubrificazione, efficace per prevenire rotture [5].

Le marche di oscillazione sono particolari difetti, derivanti dal processo di colata continua, legati al movimento oscillatorio della lingottiera. Esternamente si presentano come ondulazioni sulla superficie del semilavorato mentre internamente la microstruttura riporta una tipica conformazione a uncino, associata al movimento oscillatorio verticale della lingottiera, che altera localmente in modo significativo il trasferimento del calore e il flusso del metallo liquido nella regione del menisco, favorendo la formazione di cricche trasversali. Tra le cause che portano alla formazione di questo difetto, oltre al movimento oscillatorio della lingottiera, vi sono: la distribuzione termica all'interno della lingottiera stessa, le proprietà termiche e meccaniche del lubrificante, il contenuto di carbonio (al diminuire della percentuale di carbonio aumenta la profondità del difetto), la pressione dinamica generata dal lubrificante e dai movimenti oscillatori, e la solidificazione del menisco, che genera la presenza di pareti solide protese verso il centro della barra. Osservando la forma del menisco di solidificazione dell'acciaio si evince la genesi delle marche di oscillazione (Fig. 1) [6].

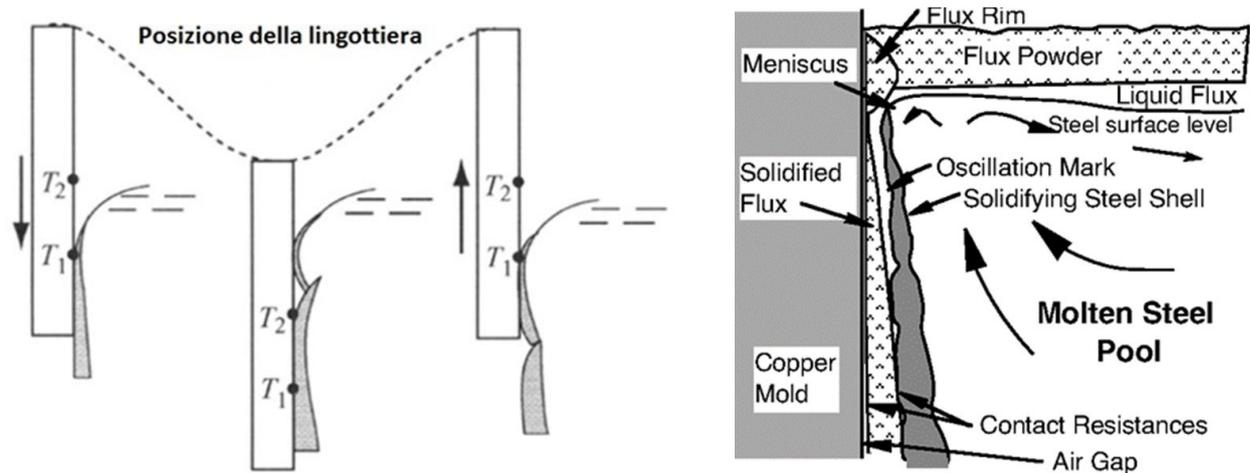


Fig.1 - Genesi delle marche di oscillazione (a) [7] e fenomeni di flusso nella zona del menisco [6] (b).

Poiché la formazione delle marche di oscillazione è inevitabile, risulta fondamentale ottimizzare i parametri di processo affinché si possa ottenere il corretto bilanciamento tra lubrificazione e profondità delle marche. Se non perfettamente sotto controllo, le marche di oscillazione possono generare due tipici difetti:

1. overflow di acciaio liquido durante la formazione del-

la marca, con possibili inglobamenti di scoria (Fig. 2a);
2. eccessivo ripiegamento del menisco con conseguente rottura del guscio solidificato e sanguinamento da fondo gola. Una rottura del menisco solidificato comporta una fuoriuscita di acciaio liquido segregato e, in alcuni casi, può inglobare scoria presente all'interno della marca di oscillazione (Fig. 2b) [8].

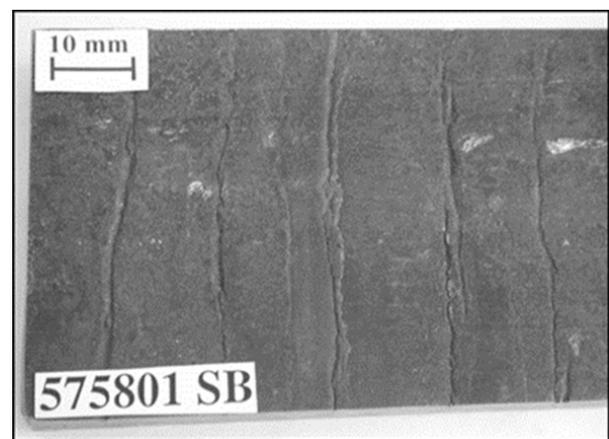
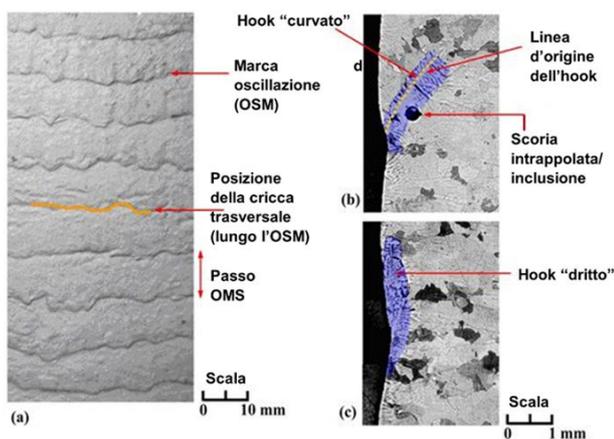


Fig.2 - Schematizzazione del fenomeno di overflow di acciaio liquido (a); fenomeno di rottura del menisco solidificato (b) [8].

Sistema di classificazione automatica dei difetti

Negli ultimi anni il mercato degli acciai inossidabili è diventato sempre più esigente in termini di qualità, soprattutto per quanto concerne l'aspetto superficiale dei prodotti finiti. È fondamentale garantire un elevato standard qualitativo, in linea con le richieste e le aspettative del cliente, al fine di incrementare le vendite sui

mercati internazionali. Inoltre, per l'acciaio inossidabile, un'adeguata qualità superficiale non è solamente un vezzo estetico, ma influisce in modo significativo sulle proprietà meccaniche e di resistenza alla corrosione. I difetti derivanti dal processo di colata continua, se non rilevati e opportunamente rimossi, possono compromettere anche in modo grave e irreparabile la qualità del

prodotto laminato, con un conseguente danno economico non trascurabile per l'azienda. Per questo motivo sono stati messi a punto sistemi di ispezione automatica per l'analisi dei difetti superficiali e sub-superficiali in linea di prodotti da colata e da laminazione. L'obiettivo principale è quello di ispezionare i prodotti al fine di identificare immediatamente la presenza dei difetti più gravi. Ciò permette di intervenire sui parametri di processo per evitarne la genesi. Inoltre, con l'utilizzo di questo strumento si riducono notevolmente i tempi di ispezione ma soprattutto si riesce ad evitare che un difetto grave di colata, se non rilevato prima delle operazioni di laminazione successive, possa influire in modo irreparabile sulla qualità del prodotto finito.

L'ispezione ottica si basa su un sistema combinato di sensori 2D e 3D, che consentono di identificare in modo accurato i difetti, indicandone estensione e profondità. Per l'ispezione della superficie della bramma vengono utilizzate in totale dieci telecamere: quattro per la superficie superiore (intradosso), quattro per la superficie inferiore (estradosso) e due per le superfici laterali, collocate dopo la via a rulli, nella zona di movimentazione e recupero delle bramme. Affinché un difetto sia rilevato correttamente, è necessario istruire il softwa-

re tramite un processo manuale di apprendimento che fornisca criteri di identificazione dei difetti e regole appositamente strutturate. Infatti, dato che il sistema si basa sull'associazione di forma, colore, dimensione e ciclicità, è necessario introdurre dei criteri che possano aiutare a distinguere tra loro tutte le tipologie di difetti, sebbene presentino caratteristiche simili.

L'obiettivo di questo lavoro è proprio quello di utilizzare il sistema automatico di rilevazione difetti per l'analisi della posizione e dell'intensità delle marche di oscillazione al fine di identificare possibili correlazioni con i parametri di processo (velocità di colata, polveri di colata e contenuto di azoto dell'acciaio). La scelta è ricaduta sulle marche di oscillazione perché sono il difetto rilevato con minor probabilità di errore dal sistema di riconoscimento e perché presenti su tutti i prodotti di colata continua, essendo intrinseche del processo.

Procedura sperimentale

L'attività sperimentale si è concentrata su due marche di acciaio inossidabile austenitico, appartenenti alla stessa famiglia, il 316L e il 316LI, che differiscono tra loro per il diverso contenuto di azoto in lega (Tab. 1).

Tab.1 - Composizione degli acciai inossidabili 316L e 316LI [9].

	C	Si	Mn	Ni	P	S	Cr	Mo	N
316L	≤0,03	≤1	≤2	10÷13	≤0,045	≤0,015	16,5÷18,5	2÷2,5	≤0,11
316LI	≤0,03	≤1	≤2	10÷13	≤0,045	≤0,015	16,5÷18,5	2÷2,5	≤0,03

Ogni sequenza analizzata è costituita da più colate, identificate a mezzo della seguente nomenclatura: la prima e l'ultima bramma della sequenza sono, rispettivamente, la 51R e la 83R; tutte le altre bramme della sequenza sono numerate da 51 a 5X, mentre l'ultima di ogni colata è la 83. Per semplificare la visualizzazione dei risultati ottenuti, la profondità delle marche è stata definita mediante una classe di profondità senza utilizzare il valore reale. Le diverse classi di profondità corrispondono a:

- classe 1: profondità < 1 mm
- classe 2: 1 < profondità < 1.5 mm
- classe 3: 1.5 < profondità < 3 mm
- classe 4: 3 < profondità < 4.5 mm
- classe 5: profondità > 4.5 mm

Inoltre, la posizione della marca sulla bramma è stata normalizzata rispetto alla larghezza e alla lunghezza della bramma stessa, in quanto non tutti i semilavorati presi in esame hanno la medesima larghezza.

I parametri presi in considerazione sono stati la velocità di colata, la capacità di lubrificazione della polvere di colata e il contenuto di azoto in lega dell'acciaio.

Risultati e discussione

Effetto della velocità di colata

Inizialmente si è cercata una possibile correlazione tra la presenza, la profondità delle marche di oscillazione, la loro disposizione sulla superficie dei semilavorati e la velocità di colata.

In letteratura è riportato che, in generale, un aumento della velocità di colata comporta una diminuzione del negative strip time (NST), a cui corrisponde una riduzione della profondità delle marche di oscillazione. I dati sperimentali raccolti sono concordi [10].

Nel grafico in Fig. 3 è riportata la variazione dei principali parametri di processo che possono condizionare la

presenza e la profondità delle marche di oscillazione nel corso di una intera sequenza tipo: velocità interessata, peso panierina, posizione asta tampone. Questi ulteriori due parametri permettono di testimoniare la bontà degli scambi siviera e la fluidità, e quindi la qualità, dell'acciaio colato al procedere della sequenza.



Fig.3 - Variazione dei parametri di processo (velocità di colata, livello asta tampone, peso panierina) durante la colata.

Fig. 3. Di conseguenza la prima parte del semilavorato è creata a velocità inferiori rispetto a quelle di regime. Ciò si traduce in una maggiore concentrazione delle marche di oscillazione al centro della larghezza della bramma. La porzione restante di bramma, una volta che la velocità di

colata arriva a regime, presenta invece un minore quantitativo di marche di oscillazione centrali. La distribuzione è pressoché simile in entrambe le marche di acciaio (Fig. 4), le differenze più marcate verranno considerate in seguito.

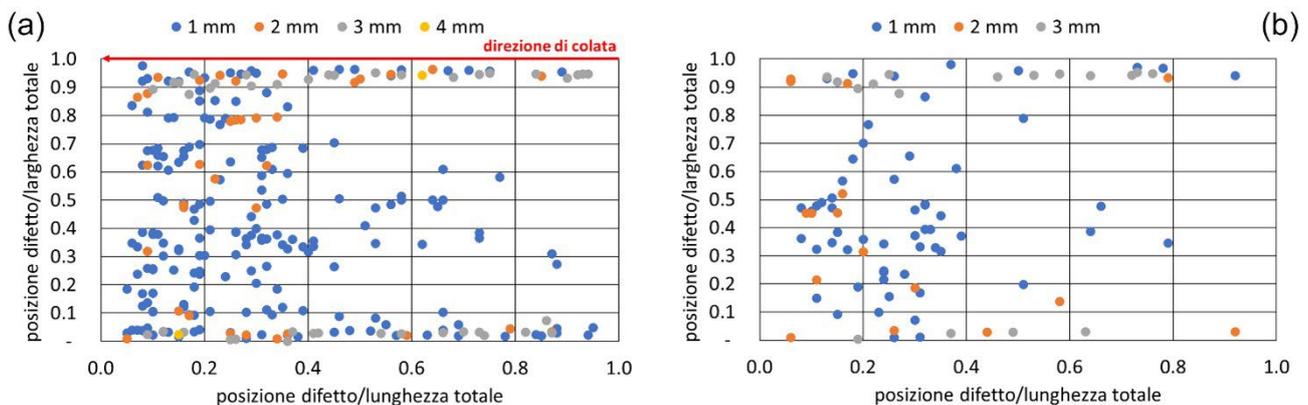


Fig.4 - Distribuzione delle marche di oscillazione sulla prima bramma della sequenza (codice 51R), acciaio 316L (a) e acciaio 316LI (b).

La prima bramma di ogni colata, poiché viene prodotta durante il cambio siviera viene considerata una bramma di transizione e può presentare delle oscillazioni centrali molto più marcate. Ciò è dovuto al fatto che i cambi siviera costituiscono un punto di discontinuità nella colata di una sequenza, nasce quindi la necessità di

individuare nei prodotti. Nel caso di un cambio siviera particolarmente lento (indicato in arancione in Fig. 3), è necessario diminuire la velocità di colata al fine di impedire un abbassamento eccessivo del livello dell'acciaio liquido in panierina, per non comprometterne la fluidità

namica. Per questo è più probabile il rischio di intrappolamento di inclusioni esogene all'interno dell'acciaio. Nel caso di cambi siviera lenti, la velocità di colata cala ancor più significativamente che rispetto al transitorio di inizio sequenza. Questo comporta l'insorgenza di marche più profonde in prossimità degli spigoli e di una maggior con-

centrazione di marche di minor profondità al centro della bramma (Fig. 5). Come nel caso precedente, si osserva la presenza di un maggior numero marche di oscillazione sul 316L (Fig. 5a) rispetto al 316LI (Fig. 5b), soprattutto nella parte centrale.

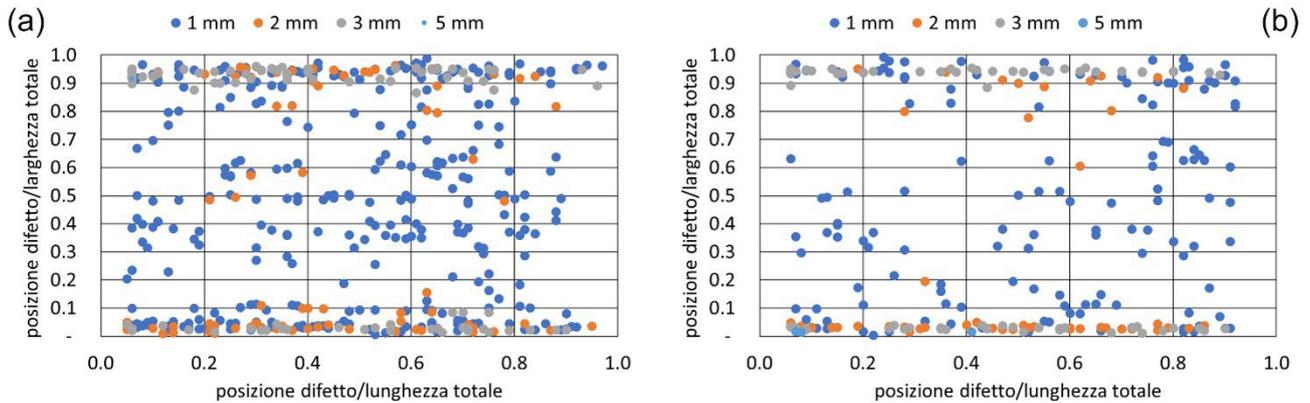


Fig.5 -Distribuzione delle marche di oscillazione su una bramma prima di colata (codice 51) in corrispondenza di uno scambio siviera lento, acciaio 316L (a) e acciaio 316LI (b).

Talvolta si rende necessario aprire lo scaricatore della siviera durante un cambio mediante lancia ad ossigeno (zona gialla di Fig. 3). Questa operazione, nonostante non comporti rallentamenti così drastici nella velocità di colata come nel caso di cambio siviera lento, può comunque provocare l'insorgenza di un numero di marche di media intensi-

tà lungo gli spigoli della bramma (Fig. 6). In questo caso l'origine delle marche di oscillazione è dovuta all'intrappolamento degli ossidi generati dal getto di ossigeno al contatto con l'acciaio residente in siviera. Tali ossidi non riescono a flottare in paniera e si ritrovano finemente dispersi nell'acciaio in colata e solidificazione.

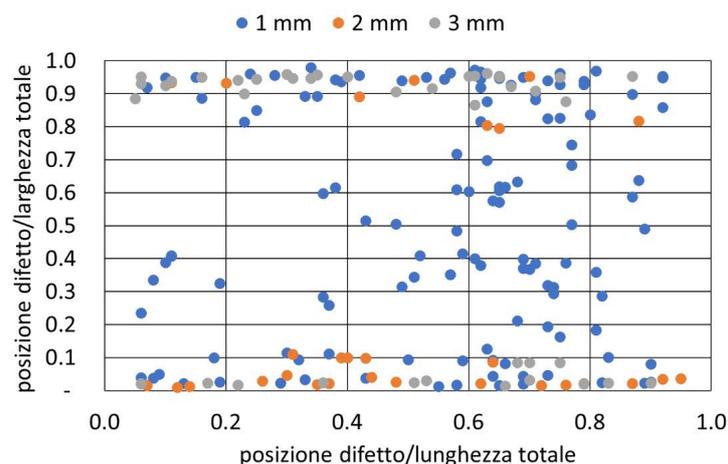


Fig.6 - Distribuzione delle marche di oscillazione su una bramma prima di colata (codice 51) corrispondente all'apertura con ossigeno della siviera, acciaio 316L.

In generale anche la seconda bramma di ogni colata presenta un'incidenza maggiore di marche di oscillazione centrali, seppur in misura minore rispetto alle bramme co-

dice 51 di ciascuna colata. Questo è dovuto al protrarsi delle due possibili cause analizzate precedentemente. Infatti, le marche di oscillazione centrali presenti nei primi metri

della bramma codice 52 potrebbero essere generate da una velocità di colata non ancora a regime, causata dagli scambi siviera problematici che avevano interessato la bramma precedente (codice 51). Analogamente, potrebbe verificarsi un residuale trascinarsi di ossidi dovuti all'apertura

con ossigeno della siviera (Fig. 7). Tuttavia, risulta evidente come la numerosità delle marche riscontrate nella seconda bramma della sequenza (codice 52) sia inferiore rispetto al semilavorato che la precedeva (codice 51).

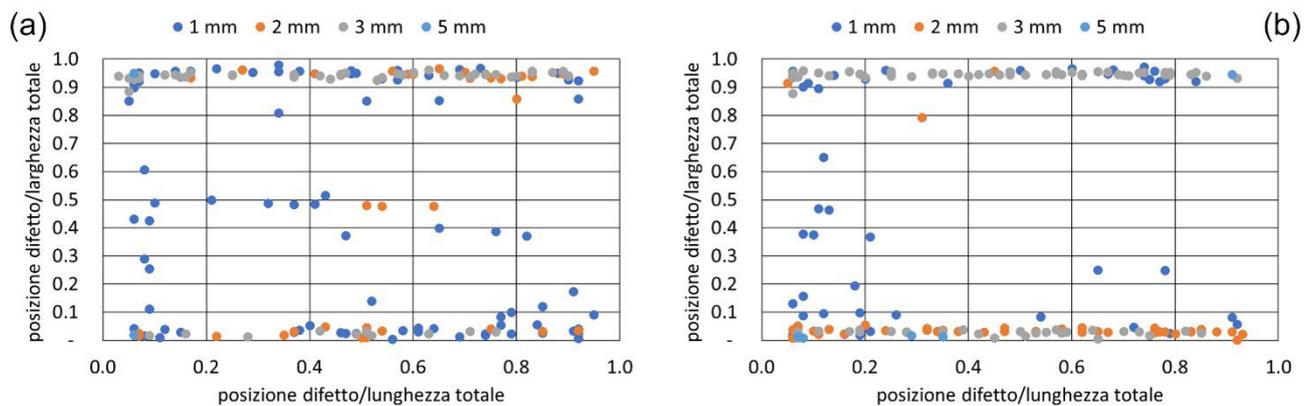


Fig.7 - Distribuzione delle marche di oscillazione su una bramma intermedia seconda di colata (codice 52), acciaio 316L (a) e 316LI (b).

Una sostanziale differenza rispetto ai casi analizzati fino ad ora si può notare nelle bramme centrali di ogni sequenza, corrispondenti a colaggi con velocità costanti e di regime, per cui l'impianto lavora alle condizioni per cui è stato ot-

timizzato (Fig. 8). Tuttavia, la presenza di marche di oscillazione, anche profonde, sugli spigoli, potrebbe essere indice di un problema di lubrificazione degli spigoli stessi.

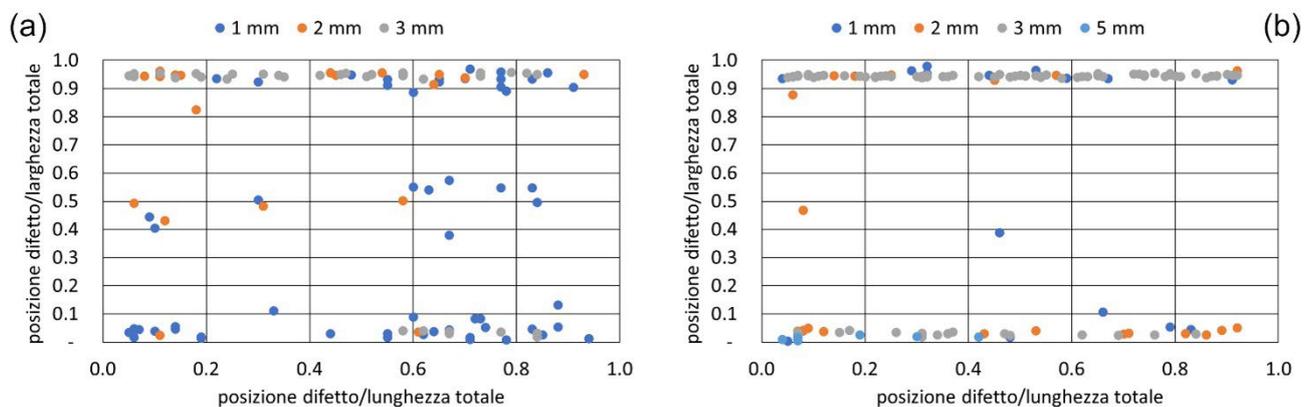


Fig.8 - Distribuzione delle marche di oscillazione sulle bramme intermedie, acciaio 316L (a) e 316 LI (b).

Effetto della capacità di lubrificazione della polvere di colata

La composizione, le proprietà e le caratteristiche delle polveri di colata determinano in modo significativo la stabilità del processo di colata continua e la qualità dei semilavorati prodotti.

Durante il colaggio la polvere fonde sulla superficie dell'acciaio, formando uno strato liquido, che in condi-

zioni ottimali si infila tra la lingottiera e la pelle solida della bramma in formazione in maniera omogenea sia sulle facce larghe, sia sulle facce strette, sia agli spigoli del semilavorato

Tuttavia, dai dati riportati in Fig. 8, è emerso un comportamento non ottimale della polvere di colata in corrispondenza degli spigoli, che comporta inevitabilmente un peggioramento complessivo della qualità delle bramme

prodotte.

Gli spigoli, per ovvi motivi geometrici, costituiscono una zona critica in cui la pelle solida della bramma in formazione subisce un'estrazione termica estremamente intensa poiché proveniente da due direzioni perpendicolari. La pelle solida risulta in questa zona più spessa e fredda e di conseguenza meno incline a deformarsi e quindi ad assecondare i movimenti della lingottiera. Ne consegue, sia per questo, sia per i confinamenti geometrici imposti, la genesi di maggiori sforzi d'attrito tra la lingottiera e la pelle solida della bramma. Tuttavia, a questo incremento degli sforzi d'attrito non corrisponde un aumento della lubrificazione, né un aumento locale della viscosità cinematica della polvere di colata liquefatta, che ne permetterebbe una migliore infiltrazione.

Quindi, la polvere di colata utilizzata dovrebbe essere ottimizzata aumentandone leggermente la viscosità, per permettere una migliore infiltrazione tra lingottiera e pelle solida della bramma, specie alle più basse temperature raggiunte nella regione degli spigoli. Questo senza che venga compromesso il buon rendimento a regime ottenuto sulle facce larghe dei semilavorati.

I dati riguardanti la numerosità dei difetti sono stati normalizzati rispetto al loro totale per bramma, come riportato

sull'asse delle ordinate in Fig.9, con l'intento di quantificare la presenza effettiva in determinate posizioni. Inoltre, i difetti sono stati riclassificati anche in base alla loro presenza sulle superfici superiore (intradosso) ed inferiore (estradosso) per individuarne un eventuale contributo alla loro genesi. Dai grafici emerge un chiaro sbilanciamento della distribuzione delle marche di oscillazione di spigolo, che tendono a concentrarsi maggiormente da un lato. La spiegazione risiede in problematiche di carattere impiantistico: è ragionevole pensare che ci possa essere un leggero disallineamento nella struttura della macchina di colata continua. Ciò comporta che la bramma in formazione tenda a scivolare e ad appoggiarsi maggiormente su uno dei due lati della lingottiera. Ne deriva un maggiore flusso termico, e soprattutto maggiori sforzi di attrito dovuti ai movimenti relativi tra lingottiera e pelle solida della bramma, sul lato destro, con la conseguente formazione di più marche di oscillazione su questo lato.

In aggiunta, la presenza maggiore di marche di oscillazione di spigolo sull'estradosso è un'ulteriore conferma dell'ipotesi precedente. Ciò è dovuto all'azione della forza di gravità che, facendo appoggiare la bramma sull'estradosso, genera un maggiore attrito tra lingottiera e pelle della bramma in formazione.

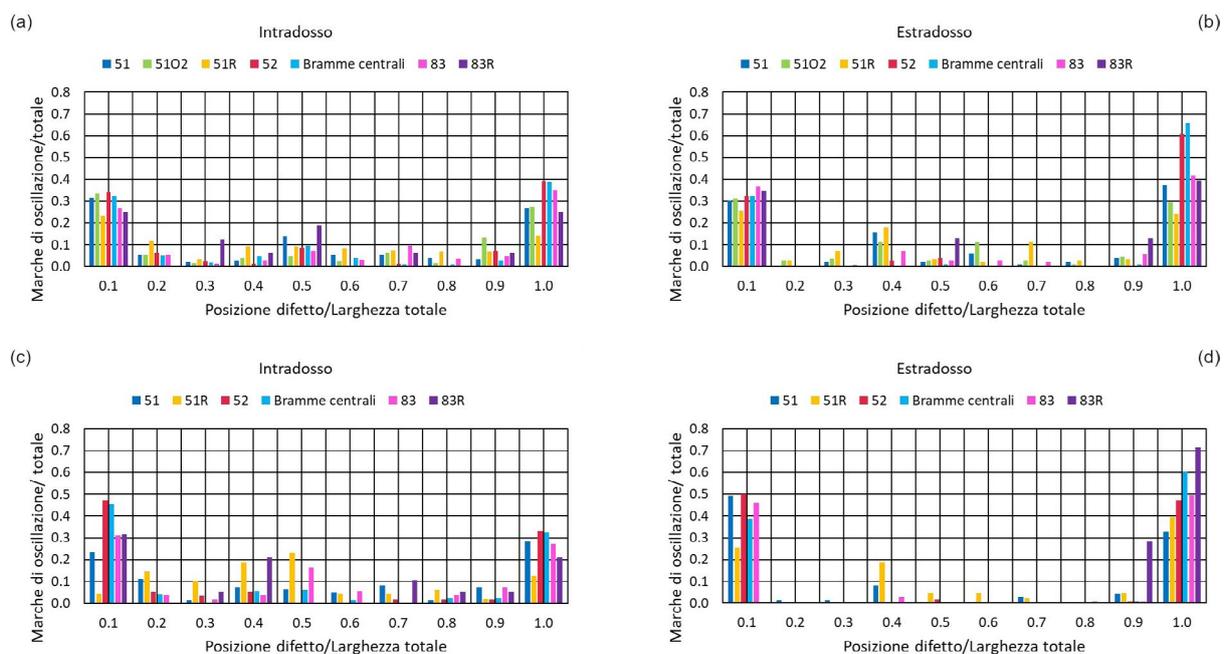


Fig.9 - Distribuzione delle marche di oscillazione sul totale: 316L intradosso (a) e estradosso (b); 316LI intradosso (c) e estradosso (d).

Effetto del contenuto di azoto

Le marche di acciaio 316L e 316LI appartengono alla stessa famiglia e presentano tenori di elementi in lega identici, con la sola differenza del contenuto di azoto, come riportato in Tab. 1. Questo permette la valutazione dell'effetto della variazione del contenuto di azoto e una sua possibile interazione con la polvere di colata rispetto alla formazione delle marche di oscillazione, poiché tutti gli altri parametri di processo sono invariati. Per raffinare ulteriormente il confronto tra le due marche acciaio ed evidenziare anche eventuali piccole variazioni sulla numerosità delle marche di oscillazione, sono state prese in considerazione soltanto le marche di oscillazione di spigolo, che, come visto precedentemente sono le più critiche, e sono state normalizzate rispetto alla lunghezza totale della bramma prodotta. I dati così ottenuti sono riportati in Fig. 10 e mostrano che per le bramme di avvio, transizione e chiusura di colata (51, 51R, 83, 83R), soggette a decrementi della velocità di colata, l'acciaio 316L, avendo un tenore di azoto più elevato, è più suscettibile alla genesi di marche di oscillazione di spigolo. Questo fenomeno è dovuto alla minore deformabilità a caldo [11], conseguenza anche di piccoli incrementi del tenore di azoto in lega, che limitano la formabilità della pelle solida della bramma in formazione e accentuano la

profondità, e conseguentemente la gravità, delle marche di oscillazione.

Tuttavia, è possibile evidenziare che per le bramme centrali della sequenza l'acciaio 316L, con un tenore di azoto più elevato, è al contrario meno suscettibile alla genesi di marche di oscillazione di spigolo rispetto al 316LI. Come visto precedentemente, una volta raggiunte le condizioni di lavoro a regime ottimali, le marche di oscillazione presenti sulle bramme di questa tipologia d'acciaio sono prevalentemente di spigolo e generate più per una locale scarsa lubrificazione dovuta a vincoli geometrici. In questo caso, il più alto contenuto di azoto risulta avere un effetto positivo sul sistema, contrastando l'effetto dei maggiori sforzi interni dovuti all'incremento del gradiente termico. Infatti, il maggior quantitativo di azoto dell'acciaio 316L, ricombinandosi, dà luogo alla formazione di microbolle gassose di N₂ che, flottando sulla superficie dell'acciaio liquido, interagiscono con la polvere di colata liquefatta, diminuendone la densità e, conseguentemente, aumentandone la viscosità cinematica e quindi la capacità d'infiltrazione [12]. Una maggiore capacità d'infiltrazione permette una migliore lubrificazione degli spigoli tra lingottiera e pelle della bramma in formazione riducendo così la profondità e la gravità delle marche di oscillazione.

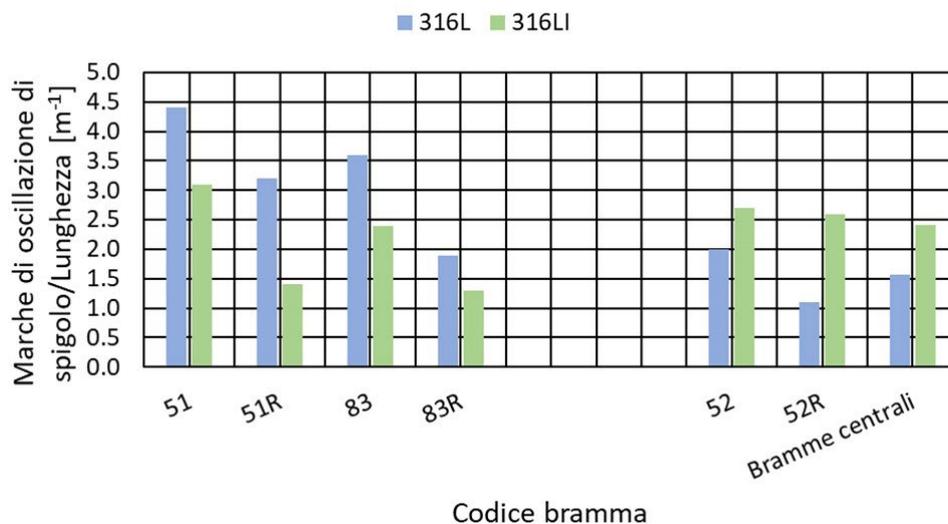


Fig.10 - Rappresentazione del valore medio del numero di marche di oscillazione di spigolo per unità di lunghezza.

Conclusioni

Attraverso l'utilizzo di un sistema automatico di ispezione visiva dei prodotti di colata continua, sono state messe in relazione le caratteristiche delle marche di oscillazione (profondità, posizione e numerosità) con alcuni parametri

del processo quali velocità di colata, lubrificazione e contenuto di azoto per due marche di acciai austenitici, AISI 316L e AISI 316LI.

L'interpretazione dei risultati ha permesso di stabilire che:

1. la velocità di colata influisce significativamente sulla pro-

fondità delle marche di oscillazione e sulla loro disposizione sulla superficie del semilavorato. In particolare, velocità inferiori a quella di regime favoriscono la genesi di marche di oscillazione centrali;

2. il comportamento lubrificante della polvere non è omogeneo sull'intera superficie del semilavorato, a svantaggio degli spigoli, zona particolarmente critica, caratterizzata da una maggiore incidenza delle marche di oscillazione, e dell'estradosso;

3. il tenore di azoto condiziona il comportamento della polvere di colata, andandone a modificare fisicamente la viscosità cinematica. A velocità di colata di regime, l'acciaio 316L trae vantaggio dal maggior tenore di azoto in lega, beneficiando di una migliore lubrificazione sugli spigoli, da cui consegue una minore gravità delle marche di oscillazione.

BIBLIOGRAFIA

- [1] (2008) Casting, in ASM Handbook, ASM International, Materials Park (OH), pp. 41–55.
- [2] Irving, W.R. (1993) Continuous casting of steel, CRC Press, Leeds.
- [3] Sguigna, D. (2019) Dispense del corso di siderurgia.
- [4] Lukin, S. V., Shestakov, N.I., and Strashko, T.I. (2007) Heat transfer of slab with mold wall in continuous-casting machine. *Steel Transl.*, 37 (3), 198–201.
- [5] Cibulka, J., Krzok, R., Hermann, R., Bocek, D., Cupek, J., and Michalek, K. (2016) Impact of oscillation parameters on surface quality of cast billets. *Arch. Metall. Mater.*, 61 (1), 283–288.
- [6] Sengupta, B.G., and Ojeda, J. (2006) Mechanism Of Hook And Oscillation Mark Formation In Ultra-Low Carbon Steel. *Carbon N. Y.*, 1, 112–117.
- [7] Lei, Z.S., Zhang, B.W., Deng, R., and Ren, Z.M. (2002) Study on meniscus temperature fluctuation during mold oscillation in continuous casting by modeling experiments. *J. Shanghai Univ.*, 6 (3), 236–239.
- [8] Camisani-Calzolari, F.R., Craig, I.K., and Pistorius, P.C. (2003) A Review on Causes of Surface Defects in Continuous Casting. *IFAC Proc. Vol.*, 36 (24), 113–121.
- [9] Steelnumber.com (2016) European Steel and Alloy Grades / Numbers. 41–43.
- [10] Takeuchi, E., and Brimacombe, J.K. (1984) The formation of oscillation marks in the continuous casting of steel slabs. *Metall. Trans. B*, 15 (3), 493–509.
- [11] Barella, S., and Gruttadauria, A. (2017) *Metallurgia e Materiali Non Metallici*, Esculapio.
- [12] Svyazhin, A.G., Kaputkina, L.M., Bazhenov, V.E., Skuza, Z., Siwka, E., and Kindop, V.E. (2015) Phases and defects upon the solidification of nitrogen-alloyed stainless steels. *Phys. Met. Metallogr.*, 116 (6), 552–561.

Lavoro vincitore del Premio Aldo Daccò 2021 ex aequo con il lavoro "Evaluation of the use of foundry sand cores on solidification and on the characteristics of structural castings: a comparison between organic and inorganic cores and validation with simulation" già pubblicato sul numero di marzo 2022".