

Titolo			Le criticità nella pratica di inoculazione e principali inoculanti
Argomento	Codice articolo	Pagine	Link utili: https://www.proservicetech.it/
Inoculazione	PSTP-S-01-01	4	
Azienda	Contatto		
Proservice srl	sales@proservicetech.it		

Introduzione

L'inoculazione è una fase tra le più critiche, ma spesso sottovalutate, dell'intero processo fusorio: da essa dipendono microstruttura, stabilità metallurgica, proprietà meccaniche e la capacità della ghisa di evitare difetti come cementite, carburi o ritiro. Nonostante ciò, viene ancora troppo spesso eseguita come un'operazione routinaria, senza un adeguato controllo metallurgico.

Questo documento apre una serie di pubblicazioni dedicate all'inoculazione, con l'obiettivo di chiarire un tema fondamentale e complesso. In questa prima parte vengono illustrati i principi di base, i meccanismi metallurgici coinvolti, le tecnologie disponibili e le principali famiglie di inoculanti, valutandone efficacia e resistenza all'evanescenza per supportare scelte tecniche consapevoli.

Le prossime uscite approfondiranno i problemi più comuni legati all'inoculazione e le soluzioni pratiche per prevenirli e gestirli in modo efficace.

Perché dobbiamo inoculare la ghisa?

Per "inoculazione" si intende l'aggiunta, poco prima o durante la colata, di piccole quantità (tipicamente 0,05–0,50%) di leghe FeSi arricchite con elementi attivi come Al, Ca, Ba, Sr, Zr, terre rare o Bi. Questi elementi favoriscono la formazione di nuclei efficaci per la nucleazione eterogenea della grafite, riducendo il sottoraffreddamento ed ampliando la finestra di solidificazione stabile (grafite) rispetto a quella metastabile (cementite).

Sebbene il silicio sia il principale promotore della grafitizzazione, da solo non è sufficiente: per ottenere una nucleazione efficace sono necessari elementi con elevata affinità per ossigeno e zolfo, capaci di generare inclusioni idonee per la nucleazione e crescita della grafite.

L'inoculazione ha lo scopo di aumentare le celle eutettiche nella ghisa grigia ed i noduli nella ghisa sferoidale, ridurre la tempra bianca, migliorare le proprietà meccaniche e la qualità metallurgica del getto. È inoltre strettamente legata al trattamento di sferoidizzazione, di cui costituisce un complemento indispensabile nella produzione di ghisa sferoidale.

Qual è la quantità ottimale di inoculante?

Non esiste un dosaggio di inoculante valido per tutte le ghise e per tutti i processi: una quantità fissa, pur semplice da applicare, non assicura la migliore qualità metallurgica, poiché la composizione dei materiali di carica e dei correttivi varia in modo significativo e non sempre prevedibile. La quantità necessaria dipende soprattutto dal tempo tra inoculazione e colata, dal potenziale di nucleazione della ghisa base, dalla temperatura del metallo, dalle tecnologie impiegate e dalle caratteristiche dei getti.

Per ottimizzare realmente le aggiunte è essenziale un controllo di processo avanzato basato su analisi termica, supportata da software evoluti come ITACAX: grazie ai valori sperimentali di temperatura eutettica e al parametro HEH (parametro esclusivo che descrive le modalità di solidificazione), è possibile regolare dinamicamente il dosaggio, migliorando la qualità della ghisa, sia base che finale, ed evitando situazioni di sotto- e sovra-inoculazione.

Cos'è il fenomeno dell'evanescenza e come si può minimizzare?

L'efficacia dell'inoculante è massima subito dopo l'aggiunta al metallo liquido e diminuisce con il tempo a causa del riassorbimento dei nuclei. Poiché nessun inoculante è immune all'evanescenza, l'inoculazione è tanto più efficace quanto più è vicina alla colata. Affidarsi esclusivamente ad un'inoculazione tardiva (sul flusso o in staffa) è però molto rischioso: non garantisce la migliore qualità metallurgica e, in caso di imprevisti, il metallo può entrare nella forma con caratteristiche insufficienti. Per questo motivo è preferibile distribuire l'inoculazione lungo tutto il processo, dalla fusione alla colata, così da minimizzare l'evanescenza, migliorare la qualità metallurgica e ridurre i rischi legati a eventuali malfunzionamenti impiantistici.

Cos'è il fenomeno della sovra-inoculazione?

Un potenziale di nucleazione insufficiente, dovuto a un'inoculazione scarsa o inefficace, è una delle principali cause di difetti da sottoraffreddamento come cementite, carburi e diverse forme di ritiro. Anche un eccesso di inoculazione può risultare dannoso: oltre una certa soglia aumenta il numero di nuclei efficaci e la crescita della grafite si distribuisce su un numero eccessivo di siti, generando noduli o lamelle più piccoli e alterando il normale equilibrio della solidificazione. In queste condizioni può modificarsi anche il bilancio tra ritiro ed espansione grafitica durante la solidificazione e, quando le materozze cessano di alimentare il getto, la compensazione del ritiro secondario può risultare meno efficace, favorendo la formazione di porosità da ritiro. Per questo motivo l'inoculazione deve essere distribuita in più fasi e regolata dinamicamente, soprattutto tramite preconditionamento e pre-inoculazione, supportata da un accurato controllo mediante analisi termica (es. ITACAX). L'inoculante si comporta come un farmaco: troppo poco è inefficace, troppo può diventare nocivo.

Quali sono le attuali pratiche di inoculazione?

Oggi sono disponibili numerosi metodi di inoculazione, così come un'ampia varietà di materiali e prodotti specifici per le diverse esigenze di processo. Le pratiche più diffuse possono essere sintetizzate come segue.

Metodo	Scopo	Materiali impiegati	Vantaggi	Svantaggi
Precondizionamento in forno	Aggiunta dell'inoculante direttamente nel forno (manuale o automatica mediante sistemi ITACA Optidose). Stabilizza la qualità della ghisa base compensando la variabilità dei materiali di carica.	Leghe FeSi 2-12 mm (fino a 2-20 mm); dosaggi fino a 0,50%.	Qualità metallurgica uniforme tra diversi forni.	Richiede aggiunte elevate; fading elevato per distanza dalla colata.
Pre-inoculazione in siviera	Aggiunta in siviera prima della spillata o durante il travaso (manuale o automatica mediante sistemi ITACA Stream XL). Suddivide l'inoculazione per compensare l'evanescenza.	Stessi materiali del precondizionamento; dosaggi inferiori 0,20-0,30%.	Riduce l'evanescenza; non fa dipendere tutto dall'inoculazione finale.	Richiede predisposizione impiantistica e gestione materiali aggiuntivi.
Post-inoculazione (sul flusso)	Massimizzare l'efficacia aggiungendo inoculante nel flusso di metallo durante la fase di colata.	Granulometria molto fine 0,2-0,7 mm; dosaggi ≤0,20%.	Massima efficacia; evanescenza minima.	Necessita dosatori avanzati (ITACA Stream) e controllo rigoroso (ITACA Vision).
Inoculazione in staffa	Inseriti o compresse posizionati nel sistema di colata per fornire una "assicurazione" finale contro il fading.	Pastiglie o compresse di inoculante.	Efficace per getti a solidificazione lenta; supporta la fase finale.	Richiede posizionamento manuale durante il ramolaggio.
Inoculazione a filo	Introdurre inoculante tramite filo animato, dopo la sferoidizzazione (mediante ITACA Wire) o nei canali (ITACA Wire LI).	Filo animato con inoculante fine racchiuso in lamina metallica.	Semplice per chi usa la sferoidizzazione a filo; riduce la scoria nel sistema di colata.	Solo con impianti dedicati; nessuna aggiunta manuale possibile.

Quali classi di inoculanti offrono la massima efficacia nella grigia e nella sferoidale?

Le principali classi di inoculanti sono leghe FeSi contenenti elementi attivi (Al, Ca, Ba, Sr, Zr, terre rare, Bi), fondamentali per aumentare il potenziale di nucleazione della ghisa e ridurre l'evanescenza. La maggior parte può essere utilizzata sia per ghisa grigia sia per ghisa sferoidale, anche se alcune formulazioni risultano più efficaci nella prima e altre nella seconda. Nella ghisa sferoidale i dosaggi necessari sono generalmente più elevati perché il magnesio, fortemente carburigeno, riduce la capacità del metallo di nucleare grafite e deve quindi essere compensato.

Di seguito viene presentato un elenco dei principali inoculanti, assumendo come riferimento il FeSi standard, caratterizzato da basso potere nucleante e scarsa resistenza all'evanescenza.

Famiglia / Tipo di inoculante	Effetto inoculante	Resistenza all'evanescenza	Caratteristiche principali / Note applicative
FeSi Al-Ca (ITACA Inoc 1320)	Medio	Media	Si adatta a un'ampia varietà di produzioni, senza introdurre particolari elementi. Nelle ghise grigie è tuttavia necessario evitare eccessivi apporti di alluminio, al fine di scongiurare il rischio di pinholes.
FeSi Ba (ITACA Inoc 56XX)	Medio	Massima	Grazie alla massima resistenza all'evanescenza, si presta molto bene come precondizionante in forno. Per la ghisa grigia è consigliato non eccedere oltre l'1% di Ba nell'inoculante.
FeSi Sr (ITACA Inoc 38XX)	Massimo	Media	Molto efficace nelle produzioni di ghisa grigia. Nelle produzioni di ghisa sferoidale lo stronzio potrebbe essere neutralizzato dalla presenza di terre rare.
FeSi Zr (ITACA Inoc 40XX)	Medio	Media	Particolarmente utile nella variante con Mn (es. ITACA Inoc 4025).
FeSi Bi (ITACA Inoc 83XX)	Alto	Media	Specifico per le produzioni di ghisa sferoidale, aumenta il numero di noduli e potrebbe essere efficace per contrastare l'insorgenza di grafite chunky.
FeSi Terre Rare (ITACA Inoc 57XX)	Alto	Alta	Specifico per le produzioni di ghisa sferoidale, funge da coadiutore per lo sferoidizzante, neutralizza l'effetto di eventuali elementi interferenti. Adatto alle produzioni di ghisa grigia solo se i livelli di zolfo sono contenuti. La presenza di lantanio riduce la tendenza al ritiro della ghisa e quindi riduce i difetti correlati.

Conclusioni

In questo lavoro sono stati analizzati i principi fondamentali dell'inoculazione ed i principali fattori che ne determinano l'efficacia, dal potenziale di nucleazione al fenomeno dell'evanescenza. Sono state fornite indicazioni pratiche su come pianificare correttamente l'inoculazione, distribuendola lungo le diverse fasi del processo per minimizzare l'evanescenza ed evitare sia sotto- che sovra-inoculazione.

È stata inoltre presentata una panoramica delle tecnologie oggi disponibili, dal precondizionamento ai metodi di pre- e post-inoculazione, fino all'inoculazione a filo, insieme ad una rassegna delle principali famiglie di inoculanti e delle relative caratteristiche applicative.

Poiché l'inoculazione è un passaggio altamente sensibile e strategico, la scelta di metodo, materiale e dosaggio deve essere accuratamente adattata alle esigenze metallurgiche e produttive della fonderia. Per le aziende che intendono ottimizzare le proprie pratiche o approfondire aspetti specifici, ProService offre il supporto dei propri metallurgisti esperti, garantendo consulenza tecnica qualificata e assistenza operativa per ottenere il massimo controllo di processo e la migliore qualità della ghisa.