

Manuale d'uso della Simulazione della Siderurgia Secondaria, versione 2

1	Introduzione ed esonero di responsabilità	2
2	Quali novità nella versione presente ?	2
	2.1 Variazioni dell'interfaccia e del design con l'utente	2
	2.2 Variazioni tecniche.....	3
3	Introduzione alla siderurgia secondaria.....	3
4	Obiettivi della simulazione.....	4
5	Descrizione e configurazione dell'impianto	5
6	Opzioni della simulazione	5
	6.1 Livello degli utenti	5
	6.1.1 Livello studenti universitari.....	6
	6.1.2 Livello tecnici di stabilimenti siderurgici.....	6
	6.2 Velocità di simulazione.....	6
	6.3 Classe di acciaio trapiantato.....	6
7	Pianificare la scaletta degli interventi	8
	7.1 Composizione.....	8
	7.2 Temperatura	10
	7.2.1 Calcolo della temperatura del liquidus	10
8	Interfaccia con l'utente	11
	8.1 Il trasporto della siviera.....	11
	8.1.1 I carri siviera.....	11
	8.1.2 I carri ponte.....	11
	8.2 Il pannello di controllo.....	11
	8.2.1 Aggiunta di leghe (Tasto A)	12
	8.2.2 Stazione di flussaggio sul pannello di controllo (Tasto F)	13
	8.2.3 Reattore di degasaggio a ricircolazione sul pannello di controllo (Tasto D).....	13
	8.2.4 CAS-OB sul pannello di controllo (Tasto C)	13
	8.2.5 Il forno siviera sul pannello di controllo (Tasto L).....	14
	8.2.6 Reattore di degasaggio sul pannello di controllo (Tasto T).....	14
	8.2.7 Richiesta di analisi chimica (Tasto R)	14
	8.2.8 Visualizzazione dell' event log (Tasto E).....	14
	8.2.9 Reinizializzazione della simulazione (tasto X)	15
9	Relazioni scientifiche sottese	15
	9.1 Calcolo delle aggiunte di leghe.....	15
	9.1.1 Calcolo delle aggiunte per ottenere la composizione desiderata... 15	
	9.2 Deossidazione.....	17
	9.2.1 Calcolo dell'aggiunta di alluminio.....	18
	9.3 Decarburazione	19
	9.3.1 Termodinamica della decarburazione	19
	9.3.2 Cinetiche della decarburazione.....	20
	9.4 Desolfurazione	21
	9.4.1 Aggiunta di scoria desolforante.....	22
	9.4.2 Deossidazione	23
	9.4.3 Agitazione nel reattore di degasaggio	23
	9.5 Rimozione dell'idrogeno	24
	9.5.1 Termodinamica.....	24
	9.5.2 Cinetica di rimozione dell'idrogeno.....	24
	9.6 Agitazione della siviera.....	25
	9.7 Riscaldamento elettrico.....	26
	9.8 Purezza dell'acciaio.....	27
10	Bibliografia	28

1 Introduzione ed esonero di responsabilità

Questo documento è stato preparato come manuale d'uso alla **simulazione della siderurgia secondaria**, disponibile sul sito <http://www.steeluniversity.org/>. La simulazione interattiva è stata concepita **quale strumento di formazione e aggiornamento** sia per studenti della metallurgia ferrosa sia per personale impiegato nel settore siderurgico.

Le informazioni contenute in esso e sui siti correlati sono rese disponibili in buona fede. Tuttavia non è data alcuna garanzia, rappresentazione, affermazione né assunto alcun impegno riguardanti sia tali informazioni sia quelle disponibili in siti collegati a questo documento attraverso collegamenti ipertestuali o di altra forma (ivi incluso ogni garanzia, rappresentazione, affermazione o impegno che una qualunque di tali informazioni o qualunque forma di uso delle stesse sia coerente e risponda a leggi locali o nazionali o alle richieste di qualsivoglia organismo di regolamentazione o con poteri di statuizione). Ogni garanzia, rappresentazione, affermazione o impegno che comunque possano derivare da tali statuizioni, contratti con clienti o altro è qui espressamente esclusa. Per nessuna ragione lo International Iron and Steel Institute, l'Università di Liverpool, o loro partners, saranno ritenuti responsabili di qualunque costo, perdita, spesa, o danno (diretto o indiretto, conseguente, speciale, economico e finanziario ivi inclusi perdite di profitti) che comunque possano derivare dall'uso delle informazioni contenute in questo documento.

Nulla di quanto in esso contenuto, potrà essere ritenuto suggerimento di natura tecnica o finanziaria che possa avere o non avere effetti di alcun modo.

2 Quali novità nella versione presente ?

Questa simulazione è stata sostanzialmente migliorata rispetto alla sua prima versione nell'agosto 2002.

2.1 Variazioni dell'interfaccia e del design con l'utente

Il tasso di simulazione può ora essere modificato in qualunque momento della stessa, invece di avere il valore fissato al suo inizio. Questo permette di decelerare la simulazione a valori critici per l'assunzione di decisioni e di ri-accelerarla in altri momenti. Comunque, tale tasso automaticamente assume il valore $\times 8$ quando il dispositivo è in movimento (e.g. bascolamento del BOF, carro siviera, movimenti dei carri ponte, etc.). A simulazione completata, esso è ripristinato al valore originale definito dall'utente. Il tasso è selezionato con un menu a tendina sull'icona posto nell'angolo in alto a sinistra dello schermo;

- E' stato rimosso il Livello di Caporeparto dell'Azienda Siderurgica;
- Aggiunta di leghe: permette l'input da tastiera via campi di testo;
- La opzione "Restart simulation" opera ora in modo più affidabile;
- Il Pannello di Controllo può ora essere aperto premendo dei tasti;
- Variazioni dell'agitazione con Ar, l'insufflaggio di O₂, l'impostazione della potenza del FEA, etc. sono ora incluse nell'evento log. Ciò rende più facile l'analisi, la diagnosi e la ripetizione della simulazione;
- Alla fine della simulazione, l'utente può ora avere visione dei "corridoi" della Composizione e della Temperatura – ovvero come esse si modificano nel tempo durante la simulazione;
- Fai da te il tuo acciaio. Copiando e organizzando un file di dati sul suo computer o web-server, ognuno può carica nella simulazione i valori desiderati. Naturalmente non sono garantiti i risultati di acciai la cui composizione è insolita etc.
- Si può accedere alla composizione chimica più recente premendo un solo tasto. Un secondo tasto permetterà di iniziare una nuova analisi chimica;
- I conflitti tra il box di dialogo Alert e il Pannello di Controllo sono stati eliminati;

- Il design dei carri siviera e dei carri-ponte sono stati modificati;
- Su di uno schermo sono riportate le assunzioni e le semplificazioni fatte;
- Il dispositivo è stato corredato di sistemi di solidità e sicurezza;

2.2 Variazioni tecniche

- L'acciaio strutturale è stato modificato nell' AISI 4140;
- La composizione dell'acciaio al TiNb a carbonio ultra-basso è stata modificata;
- Il numero di aggiunte di elementi di lega è stato ridotto, avendo eliminato da tutte le composizioni il Cu e lo Sn;
- Una siviera da 100 tonnellate è specificata per tipi di acciaio destinati a essere colati in forma di blumi o billette. Tipi di acciaio destinati ad essere colati in bramma continuano a usare siviere da 250 tonnellate;
- Per i livelli Tecnici negli Stabilimenti Siderurgici, può accadere che si registri una variazione del tempo richiesto per l'alimentazione della macchina di colata continua;
- Il modello termo-chimico è stato lievemente migliorato;
- Il tasso di recupero del Ca è stato ridotto al 15%.

3 Introduzione alla siderurgia secondaria

Nel corso degli ultimi due decenni, rilevanti mutazioni sono avvenute nelle pratiche siderurgiche.

La siderurgia tradizionale prevedeva il trasferimento diretto dell'acciaio liquido contenuto in una siviera dal reattore di affinazione Basic Oxygen Steelmaking (BOS) o dal Forno Elettrico ad Arco (FEA) alla stazione di colaggio ove l'acciaio veniva colato in lingotti. Con tale procedura era possibile soltanto il controllo della composizione dell'acciaio allo stato grezzo e della sua temperatura.

Negli anni '50 furono eseguiti i primi tentativi di rimuovere l'idrogeno mediante il **degasaggio sottovuoto**. Più di recente, i degasificatori sono stati utilizzati per produrre acciai a carbonio ultra-basso (ULC) con contenuto di carbonio inferiore a 30 ppm (0.003 wt%). Esistono due tipi di degasificatori: riciccolanti e non-riciccolanti. Tra i sistemi riciccolanti sono da includere il degasificatore **RH (Ruhrstahl-Heraeus)**, nel quale l'acciaio liquido è riciccolato attraverso il dispositivo che inietta gas inerte, argon, per ridurre la densità apparente dell'acciaio. Nei sistemi non riciccolanti quali il reattore di degasificazione, l'argon è utilizzato quale gas di agitazione.

I metodi attraverso i quali sono possibili aggiunte di elementi di lega e flussanti per affinare le composizioni dell'acciaio e/o modificare le inclusioni sono stati estesi per poter includere l'alimentazione con fili animati, aggiunte di polveri etc. Il processo **CAS-OB (Composition Adjustment by Sealed argon bubbling with Oxygen Blowing)** fornisce un modo conveniente di aggiunta di leghe in ambiente inerte, migliorando così la purezza dell'acciaio e il tasso di recupero dei componenti aggiunti. Per tasso di recupero si intende la quantità di elementi di lega aggiunti la quale contribuisce ad accrescere la composizione dell'acciaio e non è persa nella scoria, nell'atmosfera etc. Poiché molti dei processi di siderurgia secondaria danno luogo a significative variazioni di temperature, spesso diventa necessario riportare in temperatura l'acciaio in siviera durante il loro evolversi prima del colaggio. I metodi solitamente usati sono due: il riscaldamento elettrico mediante forno siviera, e il riscaldamento chimico mediante iniezione di ossigeno e alluminio (o silicio) che reagendo esotermicamente producono calore.

Tabella 3-1 Sinossi dei differenti processi di siderurgia secondaria

Processo	Degasificazione	Riscaldamento	Affinazione
Reattore RH	Rimozione di C, O, H, (più N in caso di bassi livelli di O e S)	Mediante insufflaggio di Al+O ₂	

Reattore di degasaggio	Rimozione di C, O, H, (più N in caso di bassi livelli di O e S)		
CAS-OB		Mediante insufflaggio di Al+O ₂	Aggiunta di leghe in atmosfera di argon inerte
Forno siviera		Elettrico	
Stazione di agitazione			DeS di acciaio deossidato mediante scoria sintetica più una forte agitazione /miscellazione

Attualmente, è disponibile uno spettro di dispositivi per la **siderurgia secondaria**, per tre ragioni principali:

- Essi permettono uno spettro più ampio di acciai con specifiche più severe ed esigenti;
- La CC esige una programmazione molto più severa – la siderurgia secondaria agisce da postazione di stazionamento tra lo BOS e la CC;
- La SS può generare benefici finanziari;

La presente simulazione interattiva intende illustrare taluni dei controlli di processo chiave nella siderurgia secondaria.

4 Obiettivi della simulazione

L'obiettivo della simulazione è prendere una siviera di acciaio liquido dal BOF e trasportarla alla macchina di colaggio a un **tempo e una temperatura, con una composizione e un contenuto inclusionale definiti**, con un costo dell'intera operazione che sia il **minimo possibile**.

5 Descrizione e configurazione dell'impianto

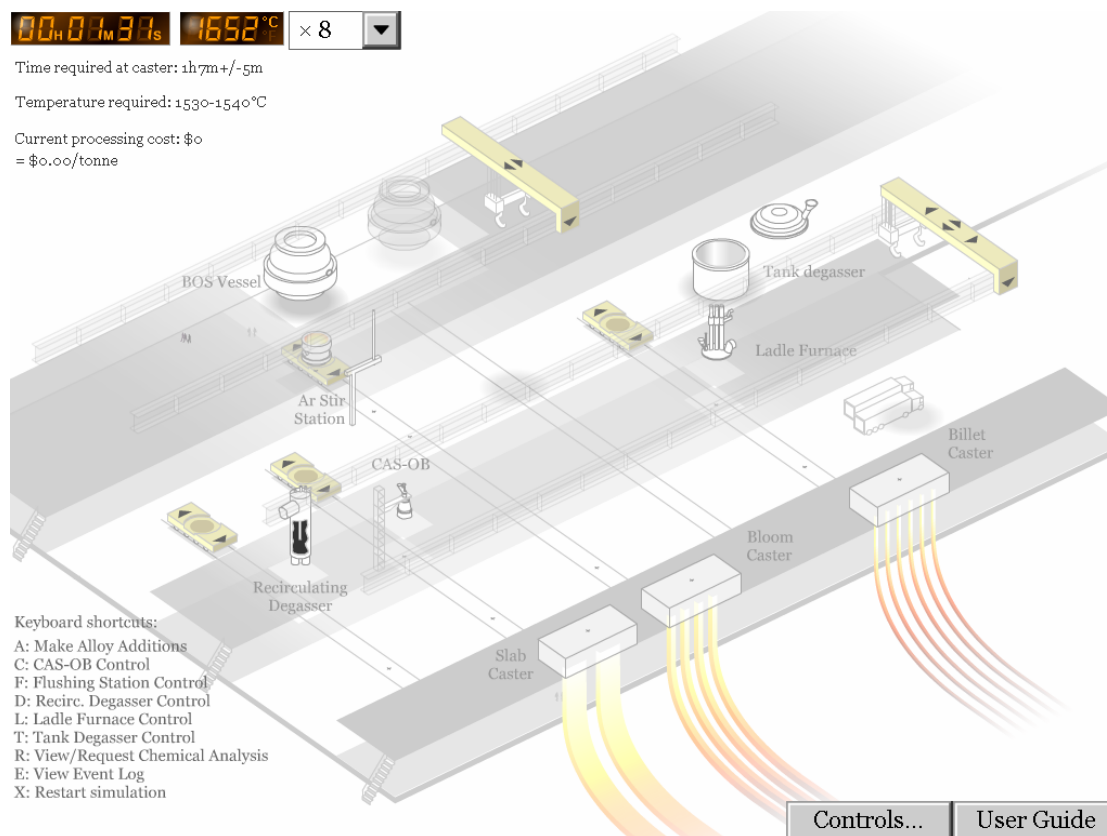


Figura 5-1 Schermata illustrante la configurazione impiantistica utilizzata nella simulazione. I carri di trasporto siviera corrono lungo una serie di binari paralleli dalla stazione BOF ai piani di colaggio. Due carri ponte, uno per ogni piano di colata, sono impiegati per sollevare la siviera fra i due carri.

L'impianto simulato ha la configurazione mostrata in figura. All'inizio della simulazione, l'acciaio è spillato nella siviera dal reattore di affinazione (BOF) attivo. (L'altro reattore BOF è inattivo).

La siviera è allontanata dal BOF su di un **carro trasportatore**. La prima sosta avviene alla **stazione di agitazione**, dove l'Ar è insufflato nella siviera per poter omogeneizzare la composizione e la temperatura.

Il **reattore di degasaggio a ricircolazione, CAS-OB e il forno siviera** sono posizionati al di sopra dei propri binari, in maniera tale da poter posizionare la siviera sul carro trasportatore al di sotto di essi. Un carro ponte è necessario per sollevare la siviera tra i carri.

Al **reattore di degasaggio** si accede abbassando la siviera direttamente con il carro ponte 1. Le tre macchine di colata sono posizionate alla fine della piattaforma e la siviera è portata ad esse mediante il carro ponte 2. Occorre essere sicuri che la siviera sia portata alla specifica macchina di colata.

6 Opzioni della simulazione

6.1 Livello degli utenti

La simulazione è stata sviluppata per essere usata da due differenti gruppi di utenti:

- Studenti universitari di metallurgia, scienza dei materiali e altre discipline ingegneristiche.
- Tecnici di stabilimenti siderurgici.

6.1.1 Livello studenti universitari

A tale livello, ci si attende da parte dell'utente un approccio scientifico al problema, mediante ricorso alle relative teorie termodinamiche e cinetiche per prendere le decisioni sulle differenti opzioni di processo.

Per esempio, si supponga che l'utente voglia calcolare la quantità di leghe da aggiungere, i tempi di degasaggio, le fluttuazioni termiche etc.

A tale livello non vi sono problemi operativi da superare e la programmazione è relativamente agevole.

6.1.2 Livello tecnici di stabilimenti siderurgici

A tale livello, ci si attende che il problema sia affrontato scientificamente. Tuttavia, possono presentarsi problemi operativi i quali possono richiedere aggiustamenti alla programmazione e il ricorso alla propria esperienza per poter prendere decisioni.

Tipici esempi di problemi operativi che possono insorgere sono variazioni dei tempi richiesti alla macchina di colata, malfunzionamenti o non disponibilità di alcune unità della siderurgia secondaria, malfunzionamenti o non disponibilità di trasportatori delle siviere, ritardi nella messa in composizione, e così via.

6.2 Velocità di simulazione

La velocità di simulazione può variare in un intervallo di valori compresi tra $\times 1$ e $\times 64$. Il valore può essere modificato in qualunque momento durante la simulazione. Tuttavia, quando l'impianto è in movimento (bascolamento del BOF, carri ponte o carri siviera in moto ecc.) la simulazione si posiziona automaticamente al valore predefinito di $\times 8$. Alla fine, il valore ripristina quello precedentemente selezionato.

6.3 Classe di acciaio trapiantato

La simulazione include un numero di differenti classi di acciaio al fine di illustrare uno spettro di differenti opzioni di processo.

La classe di **acciai per costruzione** è una classe che relativamente non esigente, la quale richiede un processamento minimo, tale da essere raccomandato per utenti novizi. Il compito principale sarà quello di assicurare i corretti livelli di aggiunta di leghe.

Gli acciai al **TiNb** a carbonio ultra-basso destinati a parti di carrozzeria auto hanno un livello di carbonio inferiore a **0.0035% C** al fine di ottimizzare la stampabilità. Questo è ca. 1/10 dei livelli di carbonio tipicamente presenti alla fine della siderurgia primaria. La priorità perciò è quella di selezionare e controllare l'unità di siderurgia secondaria idonea a rimuovere efficacemente l'eccesso di carbonio.

Gli **acciai per condotte** impiegate nella distribuzione di gas costituiscono una classe di acciai assai esigente in quanto per combinare una elevata resistenza a una elevata tenacità alla frattura sono necessari livelli di impurezza (S, P, H, O e N) e di inclusioni estremamente bassi. L'approccio a tale classe di acciai è raccomandata a utenti di maggior esperienza.

La classe degli acciai strutturali è una classe di acciai basso legati trattabili termicamente. Essa contiene aggiunte significative di Cr e Mo, e richiede anche bassi contenuti di idrogeno.

Tabella 6-1 Tabella delle composizioni di quattro classi traggurate di acciaio disponibili nella simulazione.

	Acciai da costruzione	Acciai TiNb ULC per carrozzerie auto	Acciai per condotte	Acciai strutturali
C	0.1450	0.0030	0.0700	0.4150
Si	0.2000	0.2100	0.1800	0.4000
Mn	1.4000	0.7500	1.0500	0.7500
P	<0.0250	0.0650	<0.0120	0.0350
S	<0.0200	<0.0120	<0.0030	0.0350
Cr	<0.1000	<0.0500	<0.0600	1.0500
Al	0.0350	0.0450	0.0300	0.0225
B	<0.0005	0.0030	<0.0050	0.0050
Ni	<0.1500	<0.0800	<0.0500	0.3000
Nb	0.0500	0.0200	0.0150	0.0000
Ti	<0.0100	0.0300	<0.0100	0.0000
V	<0.0100	-	<0.0100	0.0100
Mo	<0.0400	<0.0100	<0.0100	0.2250
As	-	<0.0010	-	0.0000
Ca	-	-	<0.0050	0.0000
N	<0.0050	<0.0040	<0.0045	0.0050
H	<0.0005	<0.0005	<0.0002	0.0002
O	<0.0010	<0.0005	<0.0007	0.0005

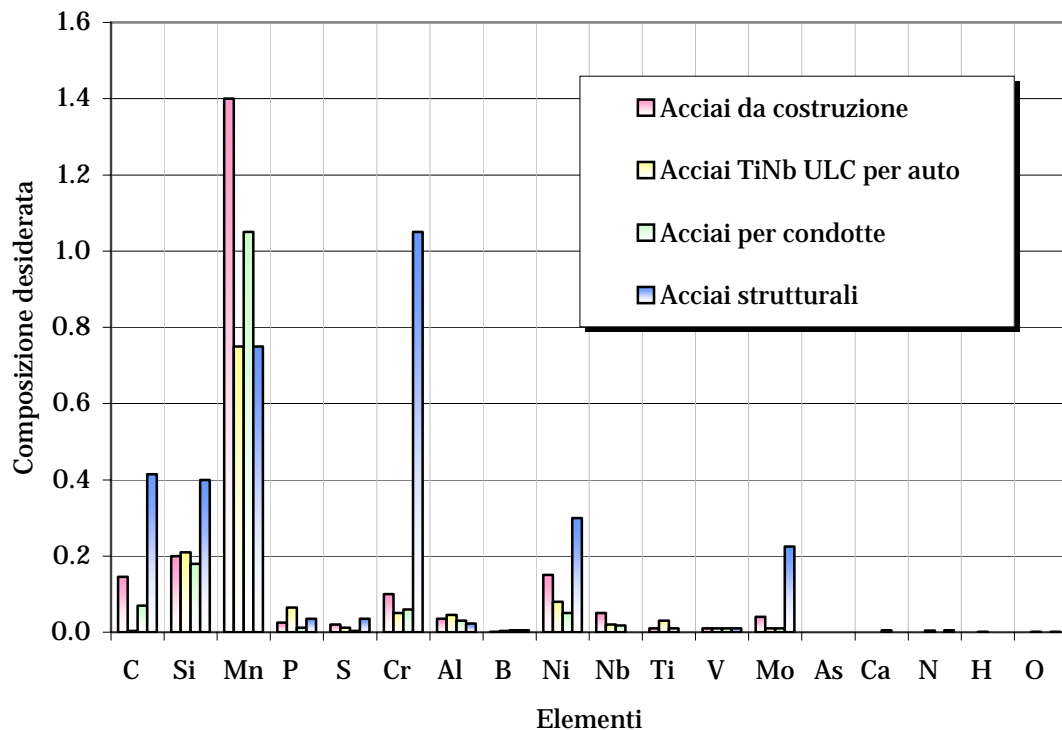


Figura 6-1 Confronto grafico delle composizioni per le quattro classi di acciaio traggurate

7 Pianificare la scaletta degli interventi

Prima di iniziare la simulazione, è importante una adeguata pianificazione. Occorre dapprima confrontare la composizione e la temperatura allo spillaggio con i valori richiesti al colaggio. Occorre quindi pensare a come raggiungere tali valori entro un tempo richiesto.

Tabella 7-1 Esempio di Composizioni allo spillaggio e composizioni attese. I livelli di carbonio, manganese, silicio e alluminio devono essere aumentati, laddove il contenuto di ossigeno deve essere ridotto.

	Spillaggio / wt%	Obiettivo / wt%	Differenza / wt%
C	0.05	0.145	+0.095
Mn	0.12	1.4	+1.28
Si	0	0.2	+0.2
Al	0	0.035	+0.035
O	0.04	0.001	-0.039
Temperatura	1650 °C	1535 °C	-115 °C

7.1 Composizione

Taluni elementi devono essere aggiunti per raggiungere la composizione desiderata. Di seguito sono riportate le domande chiavi cui occorre rispondere

- Quali additivi sono da utilizzare per raggiungere lo scopo?
- Quanto additivo (in kg) è richiesto?
- L'additivo avrà effetti anche su altri elementi e in tal caso, in che misura?
- Dove e quando procedere con l'aggiunta di additivi?
- In che modo le aggiunte hanno effetti sui costi, sulla temperatura e sulla purezza dell'acciaio?

Per ulteriore aiuto nel calcolo dell'aggiunta di leghe, vedasi Sezione 9.1 "Calcolo delle aggiunte di leghe".

Tabella 7-2 Composizioni e costi degli additivi disponibili.

Additivo	Composizione	Costo per ton
Ricarburante	98%C + Fe bal.	\$280
Alto C Ferro-Manganese	76.5%Mn, 6.7%C, 1%Si, 0.03%S, 0.3%P + Fe bal.	\$490
Basso C Ferro-Manganese	81.5%Mn, 0.85%C, 0.5%Si, 0.1%S, 0.25%P + Fe bal.	\$840
Ferro-Manganese, di elevata purezza	49%Mn + Fe bal.	\$1820
SiMn	60%Mn, 30%Si, 0.5%C, 0.08%P, 0.08%S + Fe bal.	\$560
Ferro-Silicon 75	75%Si, 1.5%Al, 0.15%C, 0.5%Mn, 0.2%Ca + Fe bal.	\$770
Ferro-Silicon 75, elevata purezza	75%Si, 0.06%Al, 0.2%Mn, 0.02%C + Fe bal.	\$840
Ferro-Silicon 45	45%Si, 2%Al, 0.2%C, 1%Mn, 0.5%Cr + Fe bal.	\$630
Fili di Alluminio	98%Al + Fe bal.	\$2100
Alluminio in pezzatura	98%Al + Fe bal.	\$1400
Ferro-Boro	20%B, 3%Si, 0.2%P + Fe bal.	\$3780
Ferro-Cromo	66.5%Cr, 6.4%C + Fe bal.	\$1260

Ferro-Molibdeno	70%Mo + Fe bal.	\$16800
Ferro-Niobio	63%Nb, 2%Al, 2%Si, 2%Ti, 0.2%C, 0.2%S, 0.2%P + Fe bal.	\$9800
Ferro-Vanadio	50%V + Fe bal.	\$8400
Ferro-Fosforo	26%P, 1.5%Si + Fe bal.	\$630
Ferro-Solfurato	28%S + Fe bal.	\$700
Nickel	99%Ni + Fe bal.	\$7000
Titanio	99%Ti + Fe bal.	\$2800
Polveri di CaSi	50%Ca, 50%Si	\$1218
Fili di CaSi	50%Ca, 50%Si	\$1540

Tabella 7-3 Tassi tipici di recupero di elementi aggiunti in aria (p.e. al BOF o alla stazione di agitazione) e sotto vuoto parziale o in atmosfera di argon (p.e. nel reattore di degasaggio, nel forno siviera, o nel CAS-OB).

Elemento	Tasso medio di recupero quando l'aggiunta è fatta nel reattore di degasaggio, nel forno siviera, o al CAS-OB*	Tasso medio di recupero quando l'aggiunta è fatta al BOF o alla stazione di agitazione
C	95%	66%
Mn	95%	66%
Si	98%	69%
S	80%	56%
P	98%	69%
Cr	99%	69%
Al	90%	63%
B	100%	70%
Ni	100%	70%
Nb	100%	70%
Ti	90%	63%
V	100%	70%
Mo	100%	70%
As	100%	70%
Ca	15%	10%
O	100%	70%
N	40%	28%
H	100%	70%
Fe	100%	70%

* Notare che questi sono solo valori medi, mentre quelli individuali possono variare da colata a colata.

NB: I tassi di recupero sono più elevati quando le aggiunte sono fatte sotto vuoto (come nei reattori di degasaggio) o in ambiente protetto da Ar (forno siviera, CAS-OB), pratiche che riducono le quantità (e il costo) delle aggiunte. Tuttavia, c'è un costo associato all'uso di tali reattori, costo che deve essere commisurato ai più alti valori dei tassi di recupero. Quale regola generale, le aggiunte più costose quali **FeNb**, **FeMo** devono essere fatte in ambiente protetto.

Altri elementi quali carbonio, ossigeno, zolfo, idrogeno, fosforo e azoto, necessitano di essere rimossi per poter centrare la composizione richiesta. Rimozione di elementi differenti

- Quale processo o sequenza di processi è la più efficace nella rimozione dell'elemento di interesse?
- Quali sono le principali variabili di processo (quale la potenza della agitazione, la chimica e il peso della scoria, l'insufflazione dell'ossigeno ecc.) e come influenzano la rimozione?

- La composizione e/o la temperature attuali dell'acciaio hanno effetto sulle cinetiche, e se sì in che modo?

7.2 Temperatura

Per permettere alla siviera di giungere alla macchina di colata alla temperature corretta, è importante essere in grado di calcolare gli effetti dei diversi processi sulla temperature della siviera.

1. Spillaggio: la temperature dell'acciaio diminuisce durante lo spillaggio di ca. 60 °C. (Notare che nella simulazione al fine di risparmiare tempo questo fenomeno è accelerato.)
2. In condizioni normali, quali tempi per il trasporto e il mantenimento della siviera, l'acciaio si raffredda ad una velocità di 0.5 °C min⁻¹.
3. Per la maggior parte delle aggiunte, ogni tonnellata di additivo produce una diminuzione addizionale di temperatura di ca. 6 °C.
4. La deossidazione con alluminio è altamente esotermica. Per ogni 100 kg of alluminio che reagisce¹ con l'ossigeno è da attendersi una crescita di temperature di 12 °C. Per realizzare il riscaldamento chimico l'alluminio può essere aggiunto con l'ossigeno iniettato del reattore di degassaggio ricircolante o mediante CAS-OB. Di nuovo, è atteso un aumento di temperature di ca. 12 °C per ogni 100 kg di alluminio che reagisce con l'ossigeno.
5. L'acciaio in siviera può essere riscaldato elettricamente nel forno siviera. A piena potenza, la velocità di riscaldamento è di ca. 3 °C min⁻¹.
6. L'agitazione in siviera mediante insufflaggio di Ar aumenta la velocità di raffreddamento a ca. 1.5 °C min⁻¹.

Mediante attento calcolo del tempo totale dal BOF alla macchina di colata, delle perdite in temperatura dovute alle aggiunte di leghe e dell'aumento dovuto al riscaldamento (elettrico o chimico) dovrebbe essere possibile prevedere la temperature dell'acciaio al colaggio.

7.2.1 Calcolo della temperature del liquidus

E' fondamentale evitare che la temperature del bagno scenda al disotto della temperature del liquidus (ossia la temperature alla quale l'acciaio inizia a solidificare). La temperature di liquidus, T_{liq} , dipende fortemente dalla composizione e può essere calcolata dalle equazioni seguenti:

Per C < 0.5%:

$$T_{liq} = 1537 - 73.1\%C - 4\%Mn - 14\%Si - 45\%S - 30\%P - 1.5\%Cr - 2.5\%Al - 3.5\%Ni - 4\%V - 5\%Mo \quad 7-1$$

Per C > 0.5%:

$$T_{liq} = 1531 - 61.5\%C - 4\%Mn - 14\%Si - 45\%S - 30\%P - 1.5\%Cr - 2.5\%Al - 3.5\%Ni - 4\%V - 5\%Mo \quad 7-2$$

¹ Si noti comunque che non tutto l'alluminio aggiunto reagisce con l'ossigeno, pertanto nel calcolo occorre che sia considerato anche il tasso di recupero dell'alluminio.

8 Interfaccia con l'utente

Questa sezione descrive la “meccanica” di base del come opera la simulazione, p.e. come far muovere la siviera, come operare per l'aggiunta di leghe, come controllare le varie parti dei dispositivi ecc.

Le relazioni scientifiche sottese (chimica, termodinamica, cinetiche di reazione ecc.) necessarie all'utente per calcolare le quantità di leghe, i parametri di processo, ecc. sono descritte nella Sezione 9.

8.1 Il trasporto della siviera

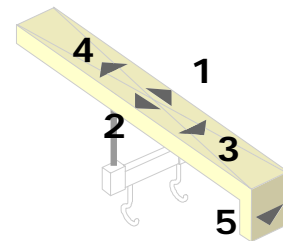
La siviera è movimentata mediante un sistema di **carri trasportatori** che viaggiano su binari paralleli tra il BOF e i piani di colata, e una coppia di **carri ponte**, uno per ogni piano. Non v'è alcuna penalizzazione di costi con nessuno dei trasportatori delle siviere.

8.1.1 I carri siviera

Ogni carro siviera è mosso lungo il suo binario cliccando sulla freccia anteriore o posteriore del carro. I carri si fermano automaticamente alle posizioni definite lungo ciascun binario - non v'è alcun bisogno di intervento dell'utente.

8.1.2 I carri ponte

Per operare con successo i carri ponte occorre una pratica maggiore, dato che i ganci dei carri ponte si muovono in uno spazio 3-D. Per facilitare la navigazione, ogni carro ponte genera un'ombra sul piano posto direttamente sotto di esso –ciò indica le sue coordinate X-Y.



Le frecce poste sui carri ponte sono impiegate per permettere il loro movimento.

- Usare le frecce 1 e 2 per muovere il carro ponte su e giù il piano di colata. Esso si ferma automaticamente alle posizioni definite lungo ciascun binario.
- Usare le frecce 3 e 4 per spostare il carro parallelamente alla propria lunghezza. Questo è però necessario solo sul piano di colata. Le frecce sono state rimosse dall'altro.
- La freccia 5 sposta inizialmente il carro ponte dalla sua posizione più elevata ad una altezza intermedia. Un secondo click abbassa i ganci alla posizione più bassa (ovvero per prendere o lasciare la siviera), quindi ritorna automaticamente alla posizione intermedia.

Si noti che il carro può essere abbassato per il trasferimento della siviera solo quando esso è nella posizione corretta.

Utilizzare il carro 2 per trasportare la siviera alla corretta macchina di colaggio. Per abbassare la siviera dal carro trasportatore, i ganci del carro ponte devono trovarsi agli estremi dell'unità (utilizzare il tasto 4 nel diagramma più sopra). Quindi cliccare il tasto 3 per muovere la siviera in avanti sulle paniere.

NB: Si raccomanda fortemente di esercitarsi adeguatamente nel controllo della siviera e del carro ponte prima di svolgere la simulazione vera e propria. Questo potrà richiedere qualche esercizio per impraticarsi, ma non sarà difficile diventare esperti nel movimentare la siviera attraverso lo stabilimento.

8.2 Il pannello di controllo

Una volta iniziata la simulazione si possono controllare le singole parti dell'impianto di acciaieria usando il Pannello di Controllo.

Cliccare sul tasto **Controls...** per aprire il menu e cliccare sulla opzione desiderata. In alternativa, premere il tasto riportato nel menu all'angolo inferiore sinistro.

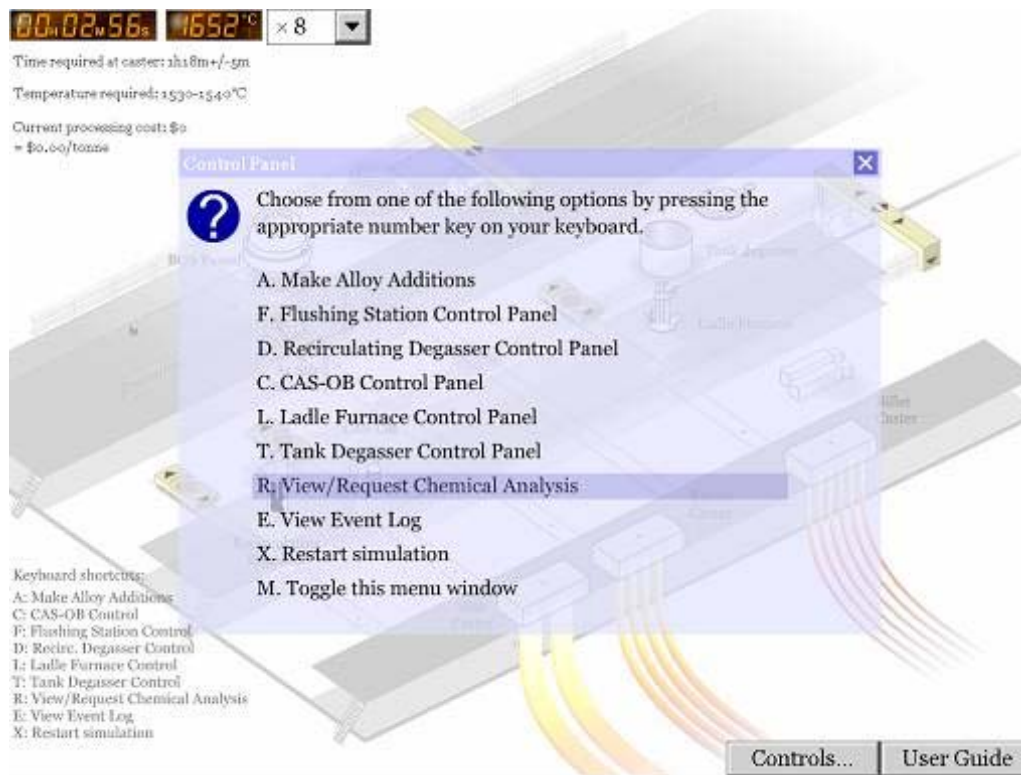


Figura 8-1 Schermata che illustra l'Interfaccia del Pannello di Controllo.

8.2.1 Aggiunta di leghe (Tasto A)

Una varietà di additivi differenti può essere aggiunta in siviera usando sul pannello di controllo la “Alloy Addition Console”. Ogni singolo additivo possiede un cursore per il controllo della quantità da aggiungere. Tutti i cursori sono inizialmente posizionati sullo zero. Il costo unitario di ogni additivo è visibile assieme al costo calcolato per la quantità scelta. Gli additivi sono suddivisi in categorie “major” e “micro”. Gli additive *Major* includono ferromanganese e ferrosilicio, e possono essere aggiunti fino a 5,000 kg. Gli additivi *Micro* includono alluminio, cromo, nickel, ferroniobio, etc. e possono essere aggiunti fino a 500 kg.

NB: Posizionare il cursore sulle etichette degli additive sulla sinistra per informazioni sulla loro composizione e sui valori tipici dei tassi di recupero.

Quando si è pronti cliccare su **Next**. Vi sarà fornita una sintesi delle aggiunte proposte. Cliccare su **Finish** per confermare l'aggiunta.

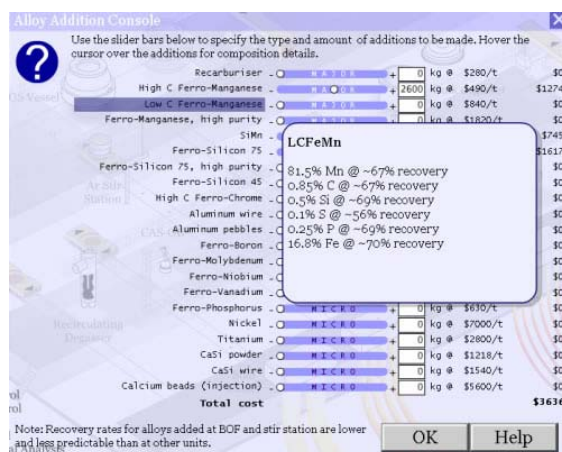


Figura 8-2 Schermata illustrante la interfaccia Aggiunta di Leghe.

Si noti che le aggiunte di leghe fatte in siviera non producono una istantanea variazione della composizione dell'acciaio, ma richiedono un tempo finito per la loro dissoluzione. Nella simulazione occorre pertanto essere certi di aver dato tempo sufficiente alla dissoluzione degli additivi nel bagno osservando quanto segue:

- Polveri, fili e particelle fini si dissolvono più rapidamente che non barrotti o materiale in pezzatura;
- L'agitazione in siviera (p.e. mediante insufflaggio di Argon) accelera i processi di dissoluzione ed è essenziale per omogeneizzare la composizione dell'acciaio;
- I tempi di miscelazione sono tanto più lunghi quanto più è bassa la temperatura.

Ci si può attendere che le aggiunte di polveri ben agitate e fatte ad alta temperatura si dissolvono più velocemente. Materiale in pezzatura aggiunto senza agitazione e a temperatura più bassa richiederà diversi minuti per dissolversi e l'acciaio in siviera non potrà essere omogeneizzato nell'intervallo di tempo impiegato per giungere alla macchina di colaggio.

8.2.2 Stazione di flussaggio sul pannello di controllo (Tasto F)

Una volta che la siviera è in posizione, cliccare sulla lancia per abbassarla nella siviera. Apparirà automaticamente una finestra di dialogo, permettendo di controllare il flusso di Ar. I costi associati con la stazione di flussaggio sono i seguenti:

- \$0.60 per Nm³ di Ar. (i.e. 1 minuto a 1.0 Nm³ min⁻¹ costa \$0.60);
- \$5.70 per minuto se si impiega una lancia.

E' da attendersi un aumento della velocità di raffreddamento di ~1.5 °C min⁻¹. Cliccare ancora sulla lancia per terminare il processo.

8.2.3 Reattore di degasaggio a ricircolazione sul pannello di controllo (Tasto D)

Una volta che la siviera è in posizione, cliccare sull'unità di degasaggio per abbassarla nella siviera. Il degasaggio ha inizio automaticamente. Apparirà una finestra di dialogo, permettendo di attivare o disattivare l'insufflaggio di ossigeno (per default è disattivato). I costi per azionare il degasaggio sono ~\$7.75 per minuto, e la velocità di raffreddamento aumenta di ~1.0 °C min⁻¹. Cliccare sull'unità di degasaggio per terminare il processo.

8.2.4 CAS-OB sul pannello di controllo (Tasto C)

Una volta che la siviera è in posizione, cliccare su l'unità CAS-OB per abbassarla nella siviera. Apparirà automaticamente una finestra di dialogo, permettendo di controllare il flusso di Ar mediante un cursore di controllo. I costi associati con il CAS-OB sono i seguenti:

- \$30 al minuto per usura del refrattario e altri materiali di consumo;
- \$0.60 per Nm³ di Ar. (i.e. 1 minuto a 1.0 Nm³ min⁻¹ costa \$0.60).

E' da attendersi un aumento della velocità di raffreddamento di ~1.5 °C min⁻¹. Cliccare di nuovo sull'unità CAS-OB per terminare il processo.

8.2.5 Il forno siviera sul pannello di controllo (Tasto L)

Una volta che la siviera è in posizione, cliccare su Forno Siviera per abbassarla nella siviera. Apparirà automaticamente una finestra di dialogo, permettendo il controllo della potenza elettrica e del flusso di Ar mediante due cursori. I costi associati con il forno siviera sono i seguenti:

- \$16.60 al minuto per elettricità al massimo della potenza di 20 MW (proporzionalmente i costi saranno minori per potenza inferiore);
- \$5.90 al minuto per usura dell'elettrodo al massimo della potenza (ancora proporzionalmente i costi saranno minori per potenza inferiore);
- \$0.60 per Nm³ di Ar. (i.e. 1 minuto a 1.0 Nm³ min⁻¹ costa \$0.60).

Cliccare di nuovo sull'unità Forno Siviera per terminare il processo.

8.2.6 Reattore di degasaggio sul pannello di controllo (Tasto T)

Diversamente dalle altre unità di siderurgia secondaria, cui si accede mediante il carro siviera, la siviera deve essere abbassata nel reattore di degasaggio direttamente dal carro ponte 1. Prima di fare questo occorre rimuovere la stringa cliccando su di essa. Una volta che la siviera è sul reattore di degasaggio, recuperare il reattore cliccando di nuovo sulla stringa. Apparirà automaticamente una finestra di dialogo, permettendo attraverso due cursori di impostare il livello di vuoto desiderato e il flusso di Ar. I costi associati con il reattore di degasaggio sono i seguenti:

- \$10 al minuto per vuoto, usura del refrattario e altro materiale di consumo;
- \$0.60 per Nm³ di Ar. (i.e. 1 minuto a 1.0 Nm³ min⁻¹ costa \$0.60).

E' da attendersi un aumento della velocità di raffreddamento di ~1.0 °C min⁻¹. Cliccare di nuovo sulla stringa per terminare il processo.

8.2.7 Richiesta di analisi chimica (Tasto R)

Può essere visualizzata la più recente analisi chimica in qualunque momento premendo il tasto R (o scegliendo **View/Request Analysis** dal Pannello di Controllo). Per questo non vi sono costi di penalizzazione.

Naturalmente la chimica dell'acciaio può essere ben modificata dal momento dell'ultima rilevazione. Per iniziare una nuova analisi, premere su **Get new**. L'analisi costa \$40 e i risultati richiedono ca. 3 minuti di simulazione per essere disponibili (p.e. ca. 22 secondi veri se la simulazione avviene ad una velocità ×8).

Il momento in cui il campione è prelevato è visualizzato nella parte superiore della finestra di dialogo. Occorre sempre avere in mente che la composizione può aver subito modifiche dal momento del prelievo del campione.

8.2.8 Visualizzazione dell' event log (Tasto E)

L' *event log* è una registrazione della cronologia di tutti i maggiori stadi di processo, ivi incluso l'aggiunta di leghe. Ciò è utile per conservare traccia di quanto fatto durante la simulazione. Esso è anche utile nel fornire un aiuto durante l'analisi dei risultati alla fine della simulazione, in quanto spesso contiene indicazioni del perché i differenti criteri impiegati hanno avuto successo o sono falliti.

8.2.9 Reinizializzazione della simulazione (tasto X)

Selezionare questa opzione se si intende reinizializzare la simulazione. Vi sarà richiesto di confermare la vostra decisione.

9 Relazioni scientifiche sottese

Questa sezione presenta le teorie scientifiche che sottendono la simulazione e le relazioni richieste per completarla con successo. In nessun modo essa è concepita per essere esaustiva della teoria e della pratica dei trattamenti in acciaieria- per fare questo, all'utente si raccomanda di rivolgersi ad altre pubblicazioni eccellenti.

9.1 Calcolo delle aggiunte di leghe

Gli additive sono aggiunti in siviera per una varietà di ragioni

- Affinare la composizione finale dell'acciaio;
- Deossidare l'acciaio mediante reazioni con l'ossigeno e formazione di ossidi che saranno intrappolate nella scoria;
- Modificare le inclusioni presenti nell'acciaio.

9.1.1 Calcolo delle aggiunte per ottenere la composizione desiderata

9.1.1.1 Aggiunta di elementi

Nel caso più semplice in cui un elemento puro è aggiunto in siviera, la quantità di additivo richiesto, m_{additivo} è semplicemente dato da:

$$m_{\text{additivo}} = \frac{\Delta\% X \times \text{massa siviera}}{100\%} \quad 9-1$$

dove $\Delta\% X$ è l'aumento in wt% X richiesto (i.e. $\%X_{\text{desiderato}} - \%X_{\text{corrente}}$)

Esempio

Si supponga che una siviera di acciaio di 250.000 kg contenga lo 0.01% Ni. Quanto Ni occorre aggiungere per ottenere la composizione desiderata di 1.0% Ni?

$$m_{\text{additivo}} = \frac{(1.0 - 0.01)\% \times 250,000 \text{ kg}}{100\%} = 2,475 \text{ kg}$$

9.1.1.2 Aggiunta di leghe madri

In molti casi, è più pratico/economico procedere alla aggiunta attraverso "**leghe madri**" piuttosto che attraverso elementi puri. (Le leghe madri sono una miscela di 2 o più componenti).

In tali casi occorre tener presente la quantità di elemento desiderato presente nella lega.

Nel calcolo occorre che sia incluso anche il "tasso di recupero"– ovvero la quantità dell'elemento che aumenta la composizione dell'acciaio liquido e che non viene disperso nella scoria ecc.

$m_{\text{additivo}} = \frac{100 \times \Delta\% X \times \text{massa siviera}}{\% X \text{ nella lega madre} \times \text{tasso di recupero di } X}$	9-2
---	-----

Esempio

Una siviera da 250 tonnellate di acciaio contiene allo spillaggio 0.12%Mn. Calcolare quanto ferro-manganese ad alto carbonio (HCFeMn) occorre aggiungere per ottenere la composizione desiderata di 1.4%Mn.

Dalla Tabella 7-2 si deduce che la HCFeMn contiene 76.5%Mn. Il tasso di recupero tipico per il Mn è 95% (dalla Tabella 7-3). Sostituendo questi valori si ottiene:

$$m_{\text{HCFeMn}} = \frac{100\% \times (1.4 - 0.12)\% \times 250,000 \text{ kg}}{76.5\% \times 95\%} = 4,403 \text{ kg}$$

9.1.1.3 Aumento di altri elementi

Quando si aggiungono leghe madri è importante anche essere consapevoli, e se necessario calcolare, l'effetto degli altri componenti sulla composizione complessiva dell'acciaio. La misura dell'aumento di un dato elemento (**pickup**) è data riscrivendo l'equazione 9-2 da cui si ottiene:

$$\Delta\% X = \frac{m_{\text{additivo}} \times \% X \text{ nella lega madre} \times \text{tasso recupero di of } X}{100 \times \text{massa siviera}} \quad 9-3$$

Esempio

Nell'esempio precedente, calcolare la quantità di pickup di carbonio.

HCFeMn contiene 6.7%C (Tabella 7-2) con un tasso di recupero del 95% (Tabella 7-3).

$$\Delta\% C = \frac{4,403 \text{ kg} \times 6.7\% \times 95\%}{100\% \times 250,000 \text{ kg}} = 0.112\% C$$

Chiaramente tale aumento di carbonio potrebbe essere critico in talune classi di acciaio a basso o ultra-basso carbonio. In tali casi, sarà necessario usare le più costose leghe madri ferromanganese a basso carbonio o a più elevata purezza.

9.1.1.4 Tempi di miscellazione

E' importante sapere che le aggiunte di leghe in siviera non modificano la composizione dell'acciaio in modo istantaneo, ma che occorre un tempo non nullo per la dissoluzione.

Nella simulazione, occorre assicurarsi di permettere un tempo sufficiente per la dissoluzione delle leghe aggiunte, tenendo presente che:

- Polveri, fili e particelle fini si dissolvono più rapidamente che non barrotti o materiale in pezzatura;
- L'agitazione in siviera (p.e. mediante insufflaggio di Argon) accelera i processi di dissoluzione ed è essenziale per omogeneizzare la composizione dell'acciaio;
- I tempi di miscellazione sono tanto più lunghi quanto più è bassa la temperatura.

Ci si può attendere che le aggiunte di polveri ben agitate e fatte ad alta temperatura si dissolvano più velocemente. Barrotti aggiunti senza agitazione e a temperatura più bassa richiederanno diversi minuti per dissolversi, sicché l'acciaio in siviera non potrà essere omogeneizzato nell'intervallo di tempo impiegato per giungere alla macchina di colaggio.

9.1.1.5 Quando procedere alle aggiunte

Le aggiunte in siviera possono essere fatte allo spillaggio, e ad ogni postazione di siderurgia secondaria (stazione di flussaggio, reattori di degassaggio, CAS-OB e forno siviera).

In generale le **aggiunte massive** sono di solito fatte allo spillaggio, mentre le aggiunte di **“finitura”** sono eseguite in stadi successivi.

Di importanza vitale è se le aggiunte vengono fatte prima o dopo la deossidazione dell'acciaio.

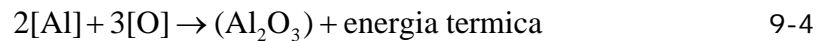
9.1.1.6 Effetto raffreddante delle aggiunte

La maggioranza delle aggiunte in siviera origina una diminuzione della temperatura dell'acciaio. Per tale simulazione, si assuma che ogni 1000 kg diano luogo a una riduzione della temperatura del bagno di 6°C. (In realtà la misura esatta dipende dalla capacità termica e dal calore di soluzione dei vari soluti).

La sola importante eccezione è rappresentata dall'alluminio, che reagendo esotermicamente con l'ossigeno presente (o già dissolto nell'acciaio o insufflato mediante lancia) apporta calore all'acciaio. Vedasi sezione 7.2 “Temperatura”.

9.2 Deossidazione

L'alluminio è un potente agente deossidante e controlla l'attività dell'ossigeno nell'acciaio liquido tramite la reazione:



per la quale la costante di equilibrio è data da:

$$K_{\text{Al-O}} = \frac{a_{\text{Al}_2\text{O}_3}}{a_{\text{O}}^3 \cdot a_{\text{Al}}^2} \quad 9-5$$

dove

$$\log K_{\text{Al-O}} = \frac{62,780}{T[\text{K}]} - 20.5 \quad 9-6$$

Riscrivendo l'equazione. 9-5 in termini di attività dell'ossigeno si ha:

$$a_{\text{O}} = \sqrt[3]{\frac{a_{\text{Al}_2\text{O}_3}}{a_{\text{Al}}^2 \cdot K_{\text{Al-O}}}} \quad 9-7$$

La relazione tra a_{O} e a_{Al} è riportata in grafico a tre differenti temperature in Figura 9-1. Si vede che la **deossidazione con alluminio è tanto più efficiente quanto più bassa è la temperatura.**

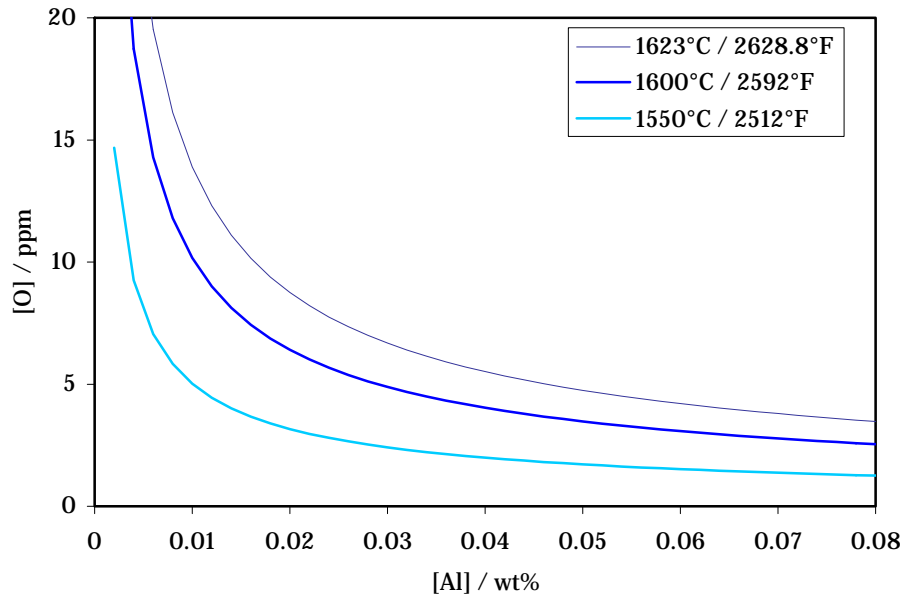


Figura 9-1 Curve di equilibrio Al-O a tre differenti temperature.

9.2.1 Calcolo dell'aggiunta di alluminio

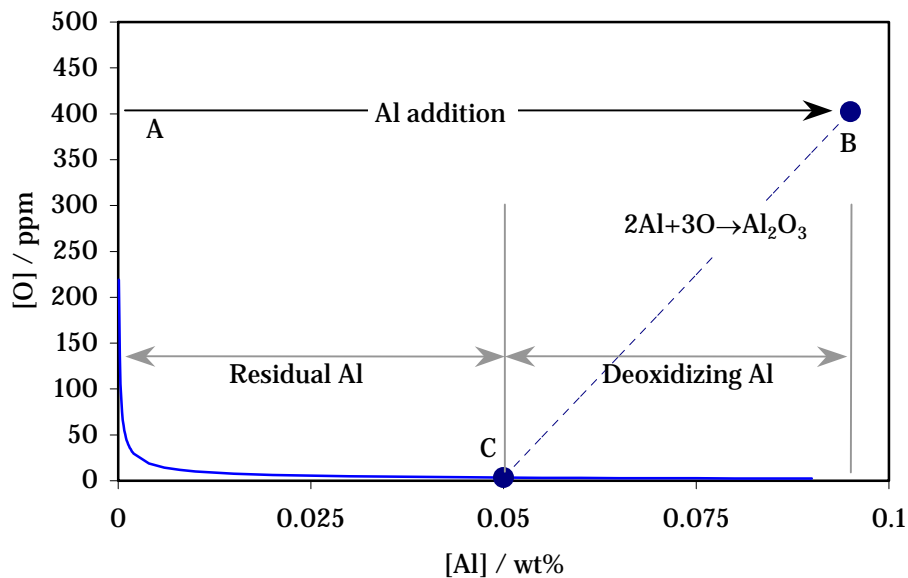


Figura 9-2 Calcolo dell'aggiunta di Al richiesta dall'inizio della attività dell'O.

Si assuma una composizione iniziale di 400 ppm di O e contenuto nullo di Al, punto A nel diagramma.

L'aggiunta di ca. 0.095% di alluminio è rappresentata dal punto B. Essendo tale punto al disopra della curva di equilibrio Al-O, l'alluminio e l'ossigeno reagiranno per formare Al_2O_3 . Stechiometricamente ciò vuol dire che 2 atomi of Al (=54 unità di massa) reagiscono con 3 di ossigeno (=48 unità di massa), lungo la linea discendente fino al punto C - composizione di equilibrio a tale temperatura. Il percentuale ponderale dell'alluminio richiesto per la deossidazione è allora:

$$\% \text{Al}_{\text{deox}} \approx \frac{54}{48} [\% \text{O}]_{\text{iniziale}} \quad 9-8$$

Se si calcola l'alluminio totale richiesto, tale valore deve essere aggiunto al valore desiderato (o residuo) per la composizione dell'acciaio.

Esempio

Una siviera di acciaio da 250 tonnellate che possiede un contenuto di ossigeno di 450 ppm (0.045%) deve essere deossidata allo spillaggio con Al. Assumendo un tasso di recupero di Al pari al 60% e una composizione in Al desiderata dello 0.04%, si perviene alla quantità di aggiunta di leghe di Al necessaria e che risulta pari al 98%.

<i>Alluminio per la deossidazione (dalla eq.9-8)</i>	$(54/48) \times 0.045\% =$	<u>0.051%</u>
<i>+ Alluminio desiderato</i>		<u>0.040%</u>
<i>= Totale alluminio richiesto</i>		<u><u>0.091%</u></u>

Si utilizzi ora la equazione 9-2 per il calcolo della massa di additivo necessaria

$$m_{\text{Al}} = \frac{100\% \times 0.091\% \times 250,000 \text{ kg}}{98\% \times 60\%} = 386 \text{ kg}$$

NB: Si rammenti che poiché l'acciaio si raffredda dopo la deossidazione, anche il prodotto di solubilità del sistema Al-O (i.e. la curva in Figura 9-1) si riduce. Ciò vuol dire che Al e O continuano a reagire, creando le condizioni per la formazione di particelle molto fini di Al₂O₃. A meno che esse non abbiano tempo di galleggiare, queste saranno intrappolate nel prodotto finale.

Per maggiori informazioni sulla formazione e rimozione di inclusioni del tipo Al₂O₃, vedasi la Sezione 9.8 "Purezza dell'acciaio".

9.3 Decarburazione

9.3.1 Termodinamica della decarburazione

La rimozione dall'acciaio del carbonio disciolto durante il degassaggio sotto vuoto avviene secondo la reazione seguente:



per la quale la costante di equilibrio è data da:

$$K_{\text{C-O}} = \frac{P_{\text{CO}}}{a_{\text{C}} a_{\text{O}}} \quad 9-10$$

Per basse concentrazioni, le attività di C e O sono equivalenti alle loro concentrazioni, sicchè:

$$K_{\text{C-O}} = \frac{P_{\text{CO}}}{[\% \text{C}] \cdot [\% \text{O}]} \quad 9-11$$

$$\log K_{C-O} = \frac{1,168}{T[K]} + 2.07 \quad 9-12$$

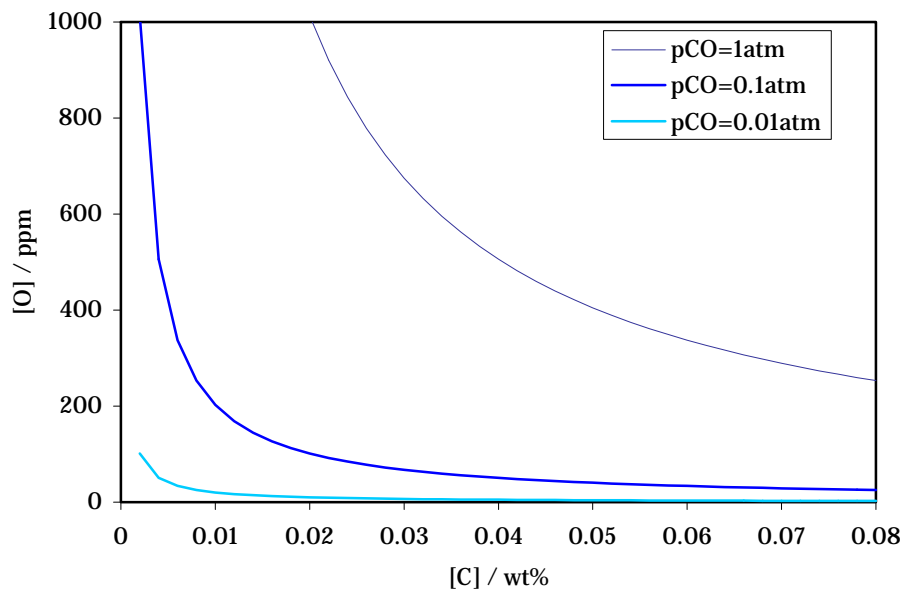


Figura 9-3 Equilibrio delle concentrazioni di [C] e [O] a differenti pressioni.

9.3.2 Cinetiche della decarburizzazione

La velocità di decarburazione è data dalla relazione seguente:

$$\ln \left\{ \frac{[\%C]_f - [\%C]_{equ}}{[\%C]_i - [\%C]_{equ}} \right\} = -k_C t \quad 9-13$$

dove

$[\%C]_f$ = concentrazione del carbonio dopo il tempo t

$[\%C]_i$ = concentrazione iniziale del carbonio

$[\%C]_{equ}$ = concentrazione del carbonio all'equilibrio

k_C = costante di tempo per la decarburazione, min^{-1}

Riscrivendo la equazione 9-13 in termini di concentrazione finale del carbonio si ottiene:

$$[\%C]_f = [\%C]_{equ} + ([\%C]_i - [\%C]_{equ}) \exp(-k_C t) \quad 9-14$$

dove $[\%C]_i$ e $[\%C]_f$ sono i contenuti di carbonio prima e dopo la decarburazione, rispettivamente, $[\%C]_{equ}$ il contenuto di carbonio all'equilibrio, e k_C è la costante di tempo per la decarburazione. Per degasificatori RH tale costante di tempo è data dalla seguente relazione.

$$k_c = \frac{Q}{V_b \rho} \frac{q}{\frac{Q}{\rho} + q} \quad 9-15$$

dove

- Q = la velocità di ricircolo dell'acciaio liquido, in kg min^{-1}
 V_b = volume del bagno in siviera, in m^3
 ρ = densità dell'acciaio liquido $\sim 7,200 \text{ kg m}^{-3}$
 q = coefficiente volumetrico di trasferimento di massa della decarburazione, in $\text{m}^3 \text{ min}^{-1}$

Per tale simulazione, si possono assumere valori tipici di $Q = 80,000 \text{ kg min}^{-1}$, $V_b =$ massa acciaio / densità = $250,000 / 7,200 = 34.7 \text{ m}^3$, e $q = 18 \text{ min}^{-1}$. Sostituendo tali valori nella equazione precedente si ottiene:

$$k_c = \frac{80,000}{34.7 \times 7,200} \frac{18}{\frac{80,000}{7,200} + 18} = 0.164 \text{ min}^{-1}$$

Esempio

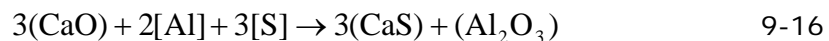
Quanto tempo occorre per decarburare un acciaio contenente 0.045% C fino a 0.002% C, assumendo un contenuto di C all'equilibrio $[\%C]_f$ di 0.0015?

$$t = -\frac{1}{k_c} \ln \left\{ \frac{[\%C]_f - [\%C]_{\text{equ}}}{[\%C]_i - [\%C]_{\text{equ}}} \right\} = -\frac{1}{0.164} \ln \left\{ \frac{0.002 - 0.0015}{0.045 - 0.0015} \right\} \approx 27 \text{ min}$$

Figura 9-4 Equilibrio delle concentrazioni di [C] e [O] a differenti pressioni.

9.4 Desolfurazione

Certe classi di acciaio, quali quelle destinate agli oleogasdotti, richiedono livelli di solfo molto bassi. La desolfurazione in siviera è controllata dalla reazione chimica:



In pratica, questo si ottiene mediante:

- Aggiunta al momento dello spillaggio del reattore di scoria sintetica desolforante a base **CaO**;
- **Deossidazione dell'acciaio con Al a valori molto bassi dell'attività dell'O** (altrimenti l'Al reagisce preferenzialmente con l'O);
- **Agitazione vigorosa dell'acciaio nel reattore di degasaggio** per miscelare il metallo con la scoria.

Viene ora descritto il controllo di processo per ciascun di tali momenti.

9.4.1 Aggiunta di scoria desolforante

Si può all'inizio della simulazione e prima dello spillaggio, aggiungere scoria sintetica a base CaO. Far uso dei cursori per:

- Specificare la massa di scoria da aggiungere. Più scoria viene aggiunta, maggior quantità di solfo può essere rimossa, pur se questo deve essere confrontato con il costo della scoria.
- Specificare la composizione della scoria in termini di rapporto CaO e Al₂O₃. Scorie con concentrazioni di CaO più elevate tendono ad avere un rapporto L_S di distribuzione dello zolfo più elevato, e sono pertanto più efficienti nella rimozione dello zolfo. Sussiste comunque il rischio di una solidificazione della scoria a valori più elevati di CaO a meno che non si riesca a mantenere una temperatura sufficientemente elevata.

In teoria la concentrazione di solfo all'equilibrio $[\%S]_{\text{equ}}$ per una determinata scoria è data da:

$$[\%S]_{\text{equ}} = [\%S]_0 \frac{\left(\frac{1}{L_S} \frac{W_m}{W_s} \right)}{1 + \left(\frac{1}{L_S} \frac{W_m}{W_s} \right)} \quad 9-17$$

dove

- $[\%S]_0$ = concentrazione iniziale di solfo, in wt%
 L_S = rapporto di distribuzione dello zolfo, dato da $(\%S)/[\%S]$
 W_s = peso della scoria, in kg
 W_m = peso del metallo, in kg

La equazione 9-17 può essere riscritta in termini di quantità di scoria richiesta per ottenere una definite concentrazione di solfo, i.e. ponendo $[\%S]_{\text{aim}} = [\%S]_{\text{equ}}$:

$$W_s = \left(\frac{W_m}{L_S} \right) \left(\frac{[\%S]_0 - [\%S]_{\text{aim}}}{[\%S]_{\text{aim}}} \right) \quad 9-18$$

Il valore di L_S è una funzione complessa della composizione della scoria, dell'alluminio disciolto nell'acciaio, della temperatura, ecc. Chiaramente per poter minimizzare la quantità e il costo della scoria desolforante, occorre un valore elevato di L_S . Selezionando un rapporto CaO:Al₂O₃ di ca. 1.2, deossidando completamente l'acciaio con Al e desolforando a temperature ben al di sopra di 1600 °C, si dovrebbe essere in grado di raggiungere valori di L_S di 500 o superiori.

Esempio

Assumendo una concentrazione di solfo allo spillaggio 0.008wt% e un rapporto di distribuzione, L_S di 500, qual è la minima quantità di scoria desolforante che occorre aggiungere una siviera di 250 tonnellate di acciaio per ottenere un livello di S pari a 0.002wt%?

Mediante l'equazione 9-18:

$$W_s = \left(\frac{250}{500} \right) \left(\frac{0.008\% - 0.002\%}{0.002\%} \right) = 1.5 \text{ tonnes}$$

N.B. Le cinetiche di desolfurazione sono tali che il livello di "equilibrio" di 0.002wt% sarebbe in pratica raggiunto solo dopo un tempo di agitazione infinito.

9.4.2 Deossidazione

Prima di procedere alla agitazione nel reattore di degasaggio, l'acciaio deve essere completamente deossidato con alluminio. Vedasi §9.2

9.4.3 Agitazione nel reattore di degasaggio

La desolfurazione è controllata dal trasferimento di massa della fase liquida. Per accelerare la desolfurazione, è essenziale una adeguata miscelazione tra metallo e scoria. Risultato che può essere ottenuto mediante vigorosa agitazione dell'Ar a livelli elevati di vuoto nel **reattore di degasaggio**.

La densità di potenza della agitazione, ε è espressa nella equazione 9-26 quale funzione della velocità di flusso dell'Ar e della pressione nel reattore.

La costante di desolfurazione, k_s appare crescere assai modestamente a valori bassi di ε , ma cresce rapidamente per valori di ε superiori a $\sim 70 \text{ W ton}^{-1}$. Ciò può forse essere spiegato dal fatto che è necessaria un valore critico della densità di potenza di agitazione per emulsionare la scoria con il metallo. In tale simulazione si può assumere:

$$k_s = 0.031\varepsilon^{0.25} \text{ per } \varepsilon < \sim 70 \text{ W ton}^{-1} \quad 9-19$$

e

$$k_s = 8 \times 10^{-6} \varepsilon^{2.1} \text{ per } \varepsilon > \sim 70 \text{ W ton}^{-1} \quad 9-20$$

$$t = \frac{\ln \left[\frac{[\%S]_t}{[\%S]_0} \left\{ 1 + \frac{1}{L_s} \left(\frac{W_m}{W_s} \right) \right\} - \frac{1}{L_s} \left(\frac{W_m}{W_s} \right) \right]}{-k_s \left[1 + \frac{1}{L_s} \left(\frac{W_m}{W_s} \right) \right]} \quad 9-21$$

Esempio

Una siviera da 250 tonnellate di acciaio contenente inizialmente 0.01%S è coperta con 2 tonnellate di scoria desolforante avente un valore di L_s di 500. Dopo deossidazione, viene insufflato Ar con una densità di potenza di agitazione, ε , equivalente a 100 W ton^{-1} . Calcolare il tempo necessario per raggiungere un contenuto di solfo pari a 0.003%S.

Si calcoli dapprima k_s per $\varepsilon = 100 \text{ W ton}^{-1}$ usando la equazione 9-20.

$$k_s = 8 \times 10^{-6} \times 100^{2.1} = 0.127 \text{ min}^{-1}$$

Si inserisca ora tale valore nella eq. 9-21:

$$t = \frac{\ln \left[\frac{0.003\%}{0.010\%} \left\{ 1 + \frac{1}{500} \left(\frac{250}{2} \right) \right\} - \frac{1}{500} \left(\frac{250}{2} \right) \right]}{-0.127 \left[1 + \frac{1}{500} \left(\frac{250}{2} \right) \right]} \sim 13 \text{ mins}$$

N.B. La combinazione di un insufflaggio di Ar vigoroso e a pressioni molto basse nel reattore di degasaggio può dar luogo a una formazione eccessiva di scoria schiumosa e al rischio che la scoria 'inondi' la siviera. In pratica, occorre un controllo accurato durante tutto il processo di agitazione sia del livello di vuoto sia del flusso di Ar nel reattore di degasaggio, per evitare che ciò avvenga. Ciò implica a sua volta che la densità di potenza dell'agitazione ϵ , e quindi la costante k_S possano subire fluttuazioni durante il trattamento di desolfurazione, e che la equazione 9-21 diventi non più una equazione di stato stazionario.

9.5 Rimozione dell'idrogeno

9.5.1 Termodinamica

L'idrogeno disciolto può essere rimosso dall'acciaio liquido mediante la formazione di gas biatomico:



dove

$$\log \frac{[\text{ppm H}]}{(p_{H_2})^{1/2}} = -\frac{1,900}{T} + 2.423 \quad 9-23$$

Tabella 9-1 Relazione tra la concentrazione di idrogeno disciolto all'equilibrio e la pressione parziale a 1600°C.

p_{H_2}	ppm H
1.0	25.6
0.1	8.10
0.01	2.56
0.001	0.81

In pratica, i degasificatori moderni possono raggiungere pressioni fino a ca. 0.001 atm. Si che in condizioni ottimali, si possono produrre acciai con livelli di idrogeno inferiori a 1 ppm.

9.5.2 Cinetica di rimozione dell'idrogeno

Chiaramente le pressioni ultrabasse discusse più sopra sono raggiungibili solo sulla superficie dell'acciaio esposto al vuoto. Al fondo della siviera, la pressione ferrostatica è pari a ca. 5 atm, che dalla eq. 9-23 corrisponde a un livello di idrogeno all'equilibrio di 57 ppm a 1600°C. Pertanto occorrono che l'alto tasso di ricircolo del metallo sia combinato con una forte agitazione perché il metallo sia degasificato completamente.

Le cinetiche di rimozione dell'idrogeno sono perciò dominate dal trasferimento di massa nell'acciaio liquido, per il quale vale la eq.:

$$\ln \left\{ \frac{[H]_f - [H]_{\text{equ}}}{[H]_i - [H]_{\text{equ}}} \right\} = -k_H t \quad 9-24$$

dove

- [H]_f = concentrazione dell'idrogeno in ppm al tempo *t*
 [H]_i = concentrazione dell'idrogeno iniziale in ppm
 [H]_{equ} = concentrazione dell'idrogeno all'equilibrio in ppm
k_H = costante di tempo per la rimozione dell'idrogeno, min⁻¹

Riscrivendo la eq. 9-24 in termini di concentrazione finale dell'idrogeno si ottiene:

$$[H]_f = [H]_{\text{equ}} + ([H]_i - [H]_{\text{equ}}) \exp(-k_H t) \quad 9-25$$

Nei **reattori di degasificazione**, la costante di tempo *k_H* è determinate largamente dal flusso di Ar insufflato per l'agitazione. Per la simulazione presente, si possono assumere le relazioni seguenti:

Impianto	<i>k_H</i> / min ⁻¹
Reattore di degasificazione	0.0576 \dot{V} + 0.02
dove \dot{V} è la velocità di flusso dell'Ar, in Nm ³ min ⁻¹ .	
Degasificatore a ricircolo	0.13

9.6 Agitazione della siviera

La omogeneizzazione della temperatura e della composizione del bagno mediante insufflaggio di Ar è causata primariamente dalla dissipazione della energia in esubero del gas iniettato. Per calcolare la potenza di agitazione si fa uso della eq. seguente.

$$\varepsilon = 14.23 \left(\frac{VT}{M} \right) \log \left(\frac{1+H}{1.48P_0} \right) \quad 9-26$$

dove:

- ε = potenza di agitazione, W tonne⁻¹
 V = tasso di insufflazione del gas, Nm³ min⁻¹
 T = temperatura del bagno, K
 M = massa del bagno, ton
 H = profondità della iniezione di gas, m
 P_0 = pressione del gas sulla superficie del bagno, atm (i.e. =1 atm quando l'acciaio è esposto all'aria)

9.7 Riscaldamento elettrico

La energia E richiesta per accrescere la temperatura del bagno di ΔT , assumendo una efficienza del 100% è data da:

$$E = mC_p \Delta T \quad 9-27$$

dove m è la massa del bagno, e C_p il calore specifico a pressione costante. In alternativa, si può riscrivere l'eq. per ottenere l'incremento teorico della temperatura:

$$\Delta T_{th} = \frac{E}{mC_p} \quad 9-28$$

La velocità teorica di riscaldamento, può dunque scriversi

$$\left(\frac{dT}{dt} \right)_{th} = \frac{dE}{dT} \cdot \frac{1}{mC_p} = \frac{P}{mC_p} \quad 9-29$$

dove P è la potenza di riscaldamento. Di conseguenza l'aumento di temperatura nell'intervallo di tempo Δt è dato da:

$$\Delta T_{th} = \frac{P \Delta t}{mC_p} \quad 9-30$$

Naturalmente l'assunzione di una efficienza del 100% non è corretta, in quanto esiste una dispersione termica attraverso gli elettrodi, l'atmosfera, i refrattari della siviera ecc. La efficienza degli elettrodi η è definita come rapporto del riscaldamento attuale sul riscaldamento teorico.

$$\eta = \frac{\Delta T_{act}}{\Delta T_{th}} \quad 9-31$$

$$\Delta T_{act} = \frac{\eta P \Delta t}{mC_p} \quad 9-32$$

ovvero, espresso in termini di tempo di riscaldamento per un definito incremento termico, ΔT_{req} :

$$\Delta t = \frac{mC_p \Delta T_{req}}{\eta P} \quad 9-33$$

Esempio

La capacità termica dell'acciaio liquido, C_p è di ca. $0.22 \text{ kW h ton}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Se la potenza dell'arco in siviera è P pari a 20 MW , calcolare il tempo richiesto per accrescere di 15°C la temperatura di una siviera da 250 tonnellate, assumendo una efficienza dell'elettrodo del 55% .

$$\Delta t = \frac{250 \text{ ton} \times 0.22 \text{ kW h ton}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \times 15 \text{ } ^\circ\text{C}}{0.55 \times 20,000 \text{ kW}} = 0.075 \text{ h} = 4.5 \text{ min}$$

9.8 Purezza dell'acciaio

Nella Sezione 9.2 si è dimostrato come la deossidazione con aggiunta di alluminio dia luogo alla formazione di particelle di Al_2O_3 . Se tali particelle non sono in grado di fluire nella scoria prima del colaggio, restano intrappolate nel prodotto finale quali inclusioni. Per molte applicazioni una certa quantità di inclusioni Al_2O_3 non influenza significativamente le proprietà. Tuttavia, per certe applicazioni quali le condotte per la distribuzione del petrolio e del gas occorrono acciai molto “puliti” – i.e. con livelli molto bassi di inclusioni di ossidi e solfuri, potendo esse agire da siti di innesco della cricca.

La chimica della formazione e successiva rimozione degli ossidi e dei solfuri durante la siderurgia secondaria è estremamente complessa e oggetto di ricerche tuttora in corso. Un trattamento delle inclusioni esaustivo è pertanto oltre gli scopi della presente simulazione. Tuttavia, viene richiesto di tenere in considerazione il largo spettro di effetti della deossidazione sulla formazione di Al_2O_3 , e assicurarsi che sia dato tempo sufficiente per permettere a tali particelle di fluire fuori dal bagno. Tale processo può essere accelerato da una lieve agitazione della siviera.

Durante la deossidazione con ossigeno, le particelle di Al_2O_3 si formano seguendo l'eq. 9-4. Il diametro medio della particella (e quindi il tasso di flottazione) risulta dipendere dal contenuto di ossigeno inizialmente disciolto.

- Per contenuti più elevati di ossigeno inizialmente disciolto (al di sopra di ca. 200ppm, o 0.02%), si formano particelle più grandi di Al_2O_3 , le quali secondo la legge di Stokes' (si veda più sotto) galleggiano fino allo strato di scoria in modo relativamente più veloce.
- Contenuti più bassi di ossigeno inizialmente disciolto danno luogo a particelle di Al_2O_3 più piccole, le quali richiedono un tempo considerevolmente più lungo per galleggiare.

La legge di Stokes stabilisce che la velocità ultima di galleggiamento, u per particelle sferiche (o bolle) è proporzionale al quadrato del diametro, d , come da eq.:

$$u = \frac{gd^2\Delta\rho}{18\eta} \quad 9-34$$

nella quale

- g = 9.81 m s⁻¹,
- $\Delta\rho$ = differenza in densità tra le particelle e l'acciaio liquido,
- η = la viscosità dell'acciaio liquido ($\sim 6.1 \times 10^{-3}$ N s m⁻² at 1600°C)

Nella simulazione, occorre calcolare accuratamente la quantità di alluminio per la deossidazione in un solo step. Se sono necessarie ulteriori aggiunte di alluminio per “rfinire” la composizione, il minor contenuto di ossigeno darà luogo alla formazione di particelle di Al_2O_3 molto piccole, che sarà difficile rimuovere dall'acciaio. Si intenderà così raggiungere livelli ‘moderati’, ‘bassi’ o ‘molto bassi’ di inclusioni a secondo della classe di acciaio scelta.

Tabella 9-1 Effetto dell'ossigeno inizialmente disciolto e dell'agitazione sui tempi necessari per raggiungere livelli "molto bassi" di inclusioni. Per "livelli" bassi, i tempi possono essere ridotti di ca. il 20%; per livelli 'moderati' di ca. il 40%.

O Inizialmente disciolto / ppm	Senza agitazione	Con agitazione
600	14 min	5 min
100	47 min	15 min
30	108 min	36 min

10 Bibliografia

- AISE, *The Making, Shaping and Treating of Steel, Steelmaking and Refining Volume*, AISE, 1998, ISBN 0-930767-02-0.
- Turkdogan, ET, *Fundamentals of Steelmaking*, The Institute of Materials, 1996, ISBN 1 86125 004 5.