

شبیه سازی فرایند تولید فولاد در کوره القایی

سید خطیب الاسلام صدرنژاد (استاد)

تورج اکبریان (دانشجوی کارشناسی ارشد)

مهرداد سرکمری (دانشجوی کارشناسی)

چکیده:

اکثر فرایندهای تولید فلز مستلزم تهیه فلز مذاب با شرایط مناسب هستند. هزینه تولید فلز مذاب، معمولاً سهم عمده‌ای از اقتصاد عملیات را در بر می‌گیرد. در فولادسازی، برای مثال، ۶۰ درصد هزینه عملیات مربوط به تهیه مواد اولیه است. برای کاهش این هزینه لازم است تدابیری اندیشیده شود. این تدابیر می‌تواند مربوط به انتخاب نوع، شرایط و نسبت‌های وزنی مواد باشند. این عوامل از دو راه "سعی و خطای عملی" و یا "محاسبه بر مبنای اصول موازنه جرمی، تعادلات ترمودینامیکی و سینتیک فرایند" قابل تعیین هستند. در این تحقیق، آمیزه‌ای از هر دو روش همراه با محاسبات مربوط به حداقل کردن هزینه تولید فلز مورد توجه و استفاده قرار می‌گیرد.

مقدمه :

کوره القایی وسیله مناسبی است برای تولید انواع فولاد زیراکترل ترکیب شیمیایی به علت کوچک بودن میزان اتلاف ماده بطور نسبتاً دقیقی قابل انجام است. بنابراین با محاسبه مقدار اجزاء تشکیل دهنده بار، درصد عناصر فلز را می‌توان در محدوده مجاز نگهداشت. در شرایطی که از برگشتیهای آلیاژی و قراضه فولاد کم کربن استفاده می‌شود، کافی است مقادیر محاسبه شده فرو آلیاژ همراه با مواد فوق را در کوره ریخته و بدون نیاز به تصفیه، از حداکثر برق مصرفی برای ذوب کردن سریع برای تولید فولاد بهره جست. تحت این شرایط لازم است ترمودینامیک و سینتیک واکنشها سهم بسیار کوچکی در تحقق فرایند تولید آلیاژ به عهده داشته باشند تا انجام عملیات در کوتاه‌ترین مدت نتیجه مطلوب را بدست دهد.

برای حداقل کردن میزان جذب گاز، بهتر است از قراضه‌های برگشتی کوره قوسی که لا اقل یکبار در گذشته گاز زدایی شده‌اند، استفاده شود. لکن در هر حال امکان گاز زدایی و نیز کنترل عوامل همراه مانند کربن، منگنز، سیلیسیوم، گوگرد و فسفر در کوره القایی هست. البته باید توجه داشت که انجام اینگونه کارها به هزینه فراوانتری نیاز داشته و طول زمانی و پیچیدگی عملیات بیشتری را به همراه دارد.

تولید فولاد از طریق ذوب قراضه برگشتی و مواد افزودنی (فروآلیاژ) در بسیاری از کارگاههای تولید قطعات فولادی در کوره‌های القایی در حال کار، قابل انجام است. بررسی فنی - اقتصادی و محاسبه هزینه مواد اولیه و عملیات فولادسازی در این کوره‌ها از اهمیت بسزایی برخوردار بوده و ساخت نرم افزارهایی که بتوانند چنین عملیاتی را تسهیل کنند بشدت مطلوب و مورد علاقه صنعت کاران و مهندسين تولید است .

بسیاری از واحدهای تولیدی، علمی و تحقیقاتی در انجام عملیات فولادسازی با اتلاف زیاد مواد و انرژی و نرسیدن به عیار مطلوب مواجهند. ساخت نرم‌افزاری که بتواند محاسبات بار و انرژی را بطور کامل و با ملحوظ کردن کلیه عوامل درگیر تسهیل کند، در شرایط حاضر دارای اهمیت فراوان و کاربرد وسیعی است .

در طراحی و ساخت این نرم افزار لازم است ضمن انجام موازنه های جرمی و حرارتی، با استفاده از شیوه‌های شبیه سازی کامپیوتری نسبت به بهینه کردن عملیات به منظور حداقل کردن هزینه ها و حداکثر کردن بازدهی فرایند نیز اقدام شود. در صورتی که از مواد متنوعی همچون آهن اسفنجی، و اکسیدهای فلزی آهن استفاده شود، به علت تولید حجم قابل توجه سرباره و ضرورت تصفیه ناخالصی ها، تغییرات اساسی در رفتار فرایند و در نتیجه محاسبات بوجود خواهد آمد [۱]. افزایش عناصر میکروآلیاژی همچون Nb، V و Ti به فلز می‌تواند باعث تغییر چشمگیر خواص و کاربرد محصولات فرایند شود [۲ و ۳]. انجام واکنش های تصفیه و انحلال در این گونه موارد از پیچیدگی های ویژه‌ای برخوردار است که تحقیق در مورد آنها را بسیار مطلوب

می‌نماید [۵۴].

حل معادله‌های ترمودینامیکی، انتقال مواد و انتقال حرارت برای تعیین میزان اتلاف و جذب مواد افزوده شده به بار، بمنظور دستیابی به مقدار و آنالیز فولاد حاصل در یک برنامه محاسباتی کامپیوتری مشابه نرم‌افزارهای ساخته شده در رابطه با ذوب و تصفیه فلزات [۶] میسر است. چنین برنامه‌ای می‌تواند مراحل اولیه طراحی و آماده‌سازی مواد را بخوبی تسهیل کند.

برای تنظیم ترکیب شیمیایی محصول دو راه وجود دارد. روش اول که بطور سنتی در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد مستلزم انجام عملیات ذوب و آلیاژسازی و سپس تصحیح آنالیز فلز از طریق نمونه‌برداری، تجزیه شیمیایی و جبران کمبود مواد فروآلیاژی تا رسیدن به ترکیب شیمیایی مطلوب از طریق مقایسه و با بکارگیری شیوه سعی و خطاست. روش دوم مستلزم انجام محاسبات ریاضی بمنظور پیش بینی میزان مواد لازم قبل از هر نوع اقدام عملی برای ذوب کردن و تجزیه فلز است. شیوه مورد نظر در این تحقیق مخلوطی از هر دو روش است. بدین ترتیب که با انجام محاسبات مربوط به موازنه جرمی، تعادلات ترمودینامیکی و سینتیک فرایند، ترکیب شیمیایی و میزان محصول کوره القایی پیشاپیش محاسبه شده، سپس از طریق ذوب کردن، نمونه‌برداری، تجزیه شیمیایی و مقایسه، تفاوت بین نتیجه محاسبات و آزمایشها تعیین و به عنوان ضریب تصحیح مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

در این تحقیق ضمن طراحی و ساخت برنامه‌ای برای محاسبه عیار بار و نحوه تنظیم آن، مطالعات مقدماتی در خصوص تعیین شرایط واقعی کار با کوره‌های القایی و شرایط ترمودینامیکی و سینتیکی حاکم بر آنها انجام می‌شود. مطالعات لازم برای تکمیل الگوریتم ریاضی برنامه در دست اقدام بوده و بمنظور دستیابی به شرایط واقعی عمل، مثالی از ذوب القایی یک نمونه فولاد SPK در یک کوره القایی صنعتی به اجرا در آمده و اطلاعات حاصل مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد.

فرمولاسیون:

بار اصلی کوره‌های ذوب فلز عموماً از مواد زیر تشکیل می‌شود:

- ۱- بلوکه‌ها: معمولاً برای شروع کار در کوره القایی بار می‌شوند.
- ۲- برگشتی‌ها: قسمتهایی از قطعات ریخته شده مانند راه گاهها، تغذیه‌ها و سایر قطعاتی که در تمیزکاری از قطعه ریختگی جدا می‌شوند.
- ۳- قراضه‌ها: مواد و قطعات زاید نظیر انتهای ورق‌های پرس شده.

۴- مواد آلیاژساز: موادی که برای رسیدن به ترکیب مورد نظر به فلز مذاب افزوده می‌شوند مانند فروآلیاژها.
 ۵- افزودنی‌های فلزدار: نمونه‌ای از این مواد، آهن اسفنجی است که حاوی حدود ۹۰ درصد آهن است.
 فرض کنید قرار است با کمک یک کوره القایی به ظرفیت W ، فلز مذابی با ترکیب معین تهیه شود که کمترین هزینه مواد اولیه را دارا باشد. مواد اولیه در دسترس را S_j می‌نامیم بطوریکه: $j = 1, 2, \dots, n$
 ترکیب شیمیایی هر کدام از مواد را با $\alpha_{i,j}$ نشان می‌دهیم که i نشان‌دهنده عنصر مورد نظر است: $i = 1, 2, \dots, m$
 و $\alpha_{i,j}$ جرم عنصر i در واحد جرم ماده اولیه S_j است.
 بهای واحد جرم S_j را با C_j نشان می‌دهیم و ترکیب شیمیایی فلز مذاب را با b_i مشخص می‌سازیم. دستگاه معادلات زیر از طریق موازنه جرمی مواد حاصل می‌شود:

$$x_1 \alpha_{1,1} + x_2 \alpha_{1,2} + \dots + x_n \alpha_{1,n} = b_1$$

$$x_1 \alpha_{2,1} + x_2 \alpha_{2,2} + \dots + x_n \alpha_{2,n} = b_2$$

$$x_1 \alpha_{m,1} + x_2 \alpha_{m,2} + \dots + x_n \alpha_{m,n} = b_m$$

$$x_1 + x_2 + \dots + x_n = 1$$

x_j مقدار ماده خام i است و b_i مقدار جزء i در کل فلز مذاب است. مجهول مسئله x_j است. بنابراین $m+1$ معادله و n مجهول داریم که باید حل کنیم.

باتقسیم کردن هر x_j بر مجموع x_j ها، معادله آخر را می‌توان حذف کرد:

$$\bar{x}_j = \frac{x_j}{\sum_{j=1}^n x_j}$$

i : جزء

j : ماده

$$AX = B$$

بصورت ماتریسی:

$$A \equiv (\alpha_{i,j})_{m \times n}$$

$$X \equiv (x_j)_{n \times 1}$$

$$B \equiv (b_i)_{m \times 1}$$

حال لازم است ترکیبی از آنها را بدست آوریم که علاوه بر ارضاء معادلات فوق، هزینه ماده اولیه را نیز حداقل کند.

آزمایشها و نتایج

در اینجا تولید فولاد ابزار SPK در کوره القایی فرکانس متوسط ۵۰۰ کیلوگرمی با آستر نوع بازی (مگنای ۹۵ شرکت فراوده‌های نسوز با مشخصات داده شده در جدول ۱) ماشین سازی اراک توسط آقای مهندس تورج اکبریان [۱] به عنوان یک نمونه واقعی تحقیقاتی مورد استفاده و تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. در این مورد بار از برگشتیهای آلیاژی، قراضه فولاد کربنی با درصد مشخص و فروآلیاژها (جدول ۱) تشکیل شده است. مقدار فلز ۵۰۰ تا ۵۵۰ کیلوگرم، حجم فلز حدود ۷۱۵۰۰ سانتیمتر مکعب و ارتفاع فلز پس از ریخته‌گری در کوکیل با سطح مقطع مربع به ضلع ۳۴ سانتیمتر، برابر ۶۲ سانتیمتر محاسبه شده است [۱].

بارکردن مواد بداخل کوره بطور ممتد انجام شده و ذوب شدن بین ۲ تا ۳ ساعت طول می‌کشد. مقدار مواد ذوب شدنی براساس تخمین اولیه به قرار زیر تعیین می‌شوند. مواد سپس توزین و بداخل کوره بار می‌شوند:

قراضه: ۴۱۰ کیلوگرم، فروکروم: ۹۲ کیلوگرم و گرافیت: ۳ کیلوگرم

نتیجه در سطر ششم جدول ۱ ذکر گردیده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، محتوای منگنز فلز، از حد انتظار بیشتر است. مسئول عملیات، علت احتمالی افزایش منگنز را آلودگی کوره در اثر ذوب کردن فولاد پرمنگنز قبل از انجام این آزمایش ذکر کرده است.

محاسبات مربوط به عیار کردن بار نشان می‌دهد که تنها بخش کوچکی از عناصر همراه بار می‌توانند از طریق واکنش شیمیایی از درون محصول خارج شوند. میزان اتلاف در اثر واکنش شیمیایی محاسبه شده و در سطر هفتم جدول ۱ ذکر شده‌اند. انجام این محاسبات توسط کامپیوتر و با فرض عدم انجام واکنش‌های ترمودینامیکی بین ۴ فاز فلز، سرباره، آستر و گاز تحقق می‌یابد.

حداقل کردن هزینه فرایند

هزینه فرایند بستگی به واکنشهای شیمیایی و اتلاف ماده در درون راکتور دارد. هر قدر مواد مورد استفاده خالص تر و واکنشهای تصفیه سریعتر به نتیجه برسند، هزینه تولید کاهش خواهد یافت. برای مثال اگر سرعت تولید به اکتیویته یا غلظت دو نوع ماده ترکیب شونده بستگی داشته باشد و نتیجتاً با مجذور میانگین خلوص مواد متناسب باشد، می‌توان نوشت:

$$\frac{dB}{dt} = k A^2$$

$\frac{dB}{dt}$: سرعت تولید فولاد در کوره القایی

k : ثابت سرعت واکنشها

A : میانگین خلوص مواد ذوب شونده

نرخ درآمد از رابطه زیر قابل تعیین است:

$$P_r = C_B G - C_v V - C_f W A_f$$

C_v : هزینه استهلاک سرمایه

A_f : میانگین خلوص مواد در هنگام ورود

C_f : هزینه مواد ورودی

P_r : نرخ درآمد

C_B : ارزش محصول

V : ظرفیت حجمی کوره ذوب

W : میانگین نرخ بارکردن مواد

$$W (A_f - A) - k V A^2 = 0$$

موازنه جرمی:

$$G = \frac{dB}{dt} V = k V A^2 = W (A_f - A)$$

اگر سرعت تولید معلوم باشد:

حال لازم است متغیرهای W، V و A را طوری انتخاب کنیم تا هزینه‌های سیستم می‌نیم شوند. فرض می‌کنیم C_v ، C_f ، k و A_f مشخص شده باشند.

محاسبات ریاضی برای بهینه‌سازی

$$C_T = C_v V + C_f W A_f$$

۱- هزینه کل:

$$C_T = \frac{C_v G}{k A^2} + \frac{C_f G A_f}{A_f - A}$$

۲- حذف متغیرهای مستقل V و W:

$$x \frac{A}{A_f}$$

۳- نسبت ماده تغییر نکرده:

$$\alpha \equiv \frac{C_v}{C_f k A_f^2}$$

$$\frac{C_T}{C_f G} = \frac{\alpha}{x^2} + \frac{1}{1-x} \quad \text{۴- نتیجه:}$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{C_T}{C_f G} \right) = 0 \quad \text{۵- محاسبه } x \text{ برای عملیات اپتیمم:}$$

$$-\frac{2\alpha}{x^3} + \frac{1}{(1-x)^2} = 0$$

$$x^3 - 2\alpha(1-x)^2 = 0$$

از رابطه فوق $x = \frac{A}{A_f}$ برای راکتور اپتیمم محاسبه می‌شود.

جمع بندی و نتیجه گیری:

شبیه سازی فرایند ذوب و تصفیه فولاد در کوره الکتریکی القایی با توجه به موازنه های جرمی و حرارتی در حال اجرا است. انجام محاسبات مربوط به ترمودینامیک و سینتیک واکنشها و حل الگوریتمهای مربوط به حداقل کردن هزینه های تولید به منظور دستیابی به طرح بهینه از جمله اهداف آتی طرح است که می بایست در تکمیل نرم افزار ملحوظ شود. مقایسه اطلاعات تجربی با کمیتهای محاسبه شده فوائد استفاده از روش شبیه سازی را روشن تر بازگو می کند.

مراجع:

- 1) K. Sadrnezhaad, "Direct Reduced Iron: An Advantageous Charge Material for Induction Furnace": Journal of Engineering, I. R. of Iran, Vol.3, Nos.1&2, 1990, 37-47.
- 2) K. Sadrnezhaad, "Effect of Inoculation on Microstructure and Properties of Low C-Mn and Low Alloy Steels": Journal of Engineering, I. R. of Iran, Vol. 4, Nos. 1&2, 1991, 65-72.

۳) صدرنژاد، "بررسی خواص و روش ساخت فولادهای میکروآلیاژی": کارنامه پژوهشی شریف، ۱۳۷۱، ۴۶۰ - ۴۶۴.

4) R. C. Sharma, V. R. Lakshmanan and J.J Kirkaldy : Metall. Trans. A , 15A, 1984 , 545-553.

5) K. Balasubramanian and J. S. Kirkaldy: CALPHAD , 10, 2, 1986, 187 - 202.

۶) صدرنژاد و سیم‌چی: "شبه‌سازی ذوب و تصفیه مستقیم": مجموعه مقالات پژوهشی سال ۱۳۷۳ دانشکده متالورژی، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۵ - ۱۴۵.

جدول ۱ - مشخصات باره فلز و آستر کوره القایی مورد استفاده برای ساخت فولاد.

ترکیب شیمیایی (درصد وزنی)															بار		
خاکستر	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	H ₂ O	H	N	P	S	Mo	Ni	Si	Mn		Cr	C
									۰/۰۳۳۴	۰/۰۲۷۴	۰/۰۳۳۳	۰/۱۰۳۴	۰/۰۶۲۹	۰/۳۴۴۴	۰/۱۴۰۲	۰/۱۲۸۵	فراشه
									۰/۰۳	۰/۰۴			۲		۶۵-۷۷	۵-۸	فروکروم
۰/۳						۰/۲	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۵						۰/۰۲	۹۹	پودر گرافیت
	۱	۱/۵	۲/۵	۴	۹۲												آستر کوره
									۰/۰۲۵	۰/۰۳۷	۰/۰۳۵۸	۰/۷۲۱	۰/۲۱۱۳*	۰/۶۱۷	۱۲/۵۰	۲/۰۲۱	فلز حاصل
									۰/۰۲۴	۰/۰۲۰	۰/۰۲۷۸	۰/۸۳۹	۰/۴۱۵۴	۰/۲۷۹۶	۱۳/۰۵	۱/۸۹	نتیجه محاسبه
									-	-	-	-	-	-	۴/۲	-	اتلاف (درصد)

* احتمال ورود عنصر از طریق آلودگی مربوط به بارهای قبلی.