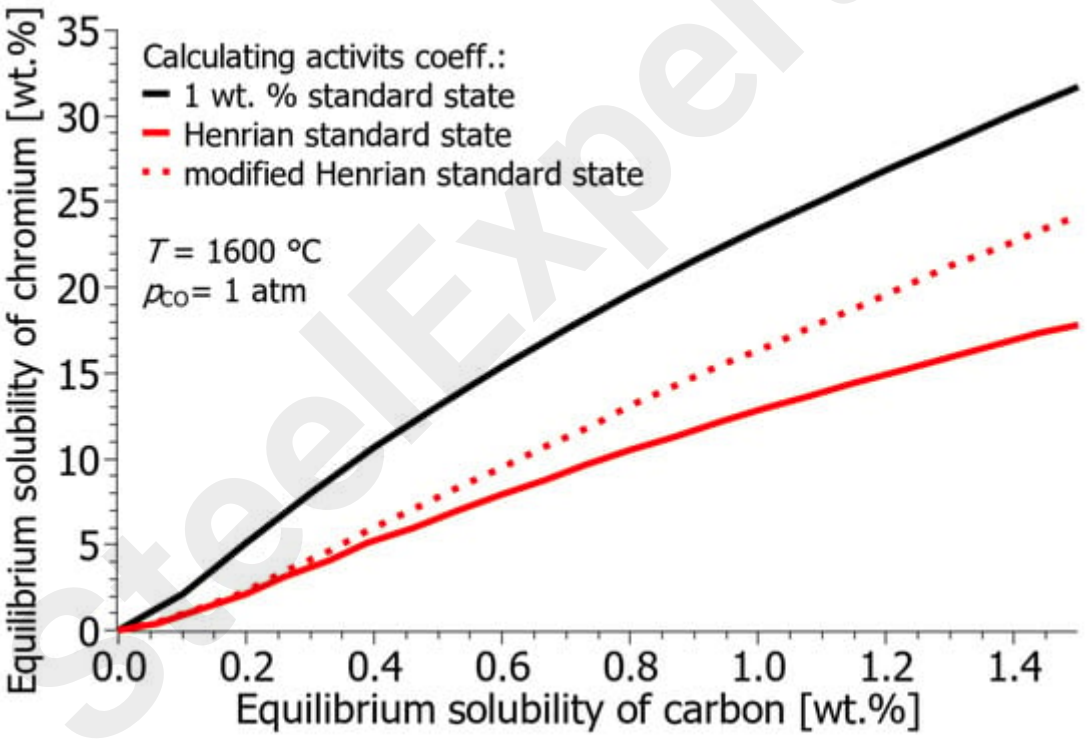
مرکز دانش شبکه خبرگان صنعت فولاد

راهنمای ترمودینامیکی کاهش اتلاف کروم در فولادسازی کوره قوس الکتریکی

مقالات تخصصی | شبکه خبرگان صنعت فولاد | ۱۴۰۵/۰۸/۰۵

بررسی ترمودینامیک اکسایش کروم و کربن در تولید فولاد زنگ‌نزن؛ نقش دمای مذاب، سیلیسیم، فشار جزئی CO، سرباره و کنترل اکسیژن در کوره قوس الکتریکی.



نویسندگان: آنژه بایژل (Anže Bajželj) و یاکا بوریا (Jaka Burja) | **نشریه:** Metals، سال ۲۰۲۵، جلد ۱۵، مقاله ۱۱۲۹ | **DOI:** 10.3390/met15101129

منبع اصلی: MDPI / Metals | **مجوز:** CC BY 4.0. این نسخه ترجمه فارسی با تغییر زبان و قالب انتشار است. از ۱۱ شکل اصلی، ۸ شکل مجاز بازنشر شده‌اند و سه شکل اقتباسی فقط ارجاع دارند.

چکیده

در تولید فولاد زنگ‌نزن، اتلاف کروم به‌ویژه در مرحله کوره قوس الکتریکی (EAF) یکی از مسائل مهم فرایندی است. این پژوهش با مرور و تحلیل ترمودینامیک سامانه Fe–Cr–C–O–(Si) به این مسئله می‌پردازد و ناسازگاری داده‌های منتشرشده، از جمله انرژی آزاد گیبس، پارامترهای برهم‌کنش و سایر کمیت‌های ترمودینامیکی را نشان می‌دهد. نویسندگان بر پایه داده‌های معتبر علمی، مدلی ترمودینامیکی و ساده برای شبیه‌سازی اکسایش ساخته‌اند. این مدل حلالیت تعادلی کروم و کربن را محاسبه می‌کند و نشان می‌دهد که دما، فشار جزئی مونوکسیدکربن و غلظت سیلیسیم چگونه بر اکسایش کروم اثر می‌گذارند. نتایج تأیید می‌کند که دمای بالاتر و حضور سیلیسیم، با مساعدکردن شرایط اکسایش کربن نسبت به کروم، اتلاف کروم را به‌طور محسوسی کاهش می‌دهد. در پایان، دستورالعمل‌هایی عملی برای کاهش اتلاف کروم در EAF پیشنهاد شده است؛ از جمله محافظت از قراضه به کمک کربن، سیلیسیم و آلومینیوم، کنترل ورود اکسیژن و حفظ دمای بالای مذاب هنگام کربن‌زدایی. هدف این توصیه‌ها افزایش صرفه اقتصادی و پایداری تولید فولاد زنگ‌نزن است. مقاله حاضر نسخه توسعه‌یافته یک مقاله کنفرانسی پیشین است.

کلیدواژه‌ها: فولادسازی، ترمودینامیک، فولاد زنگ‌نزن، کوره قوس الکتریکی (EAF)، کربن‌زدایی، اکسایش مذاب فولاد

۱. مقدمه

در فولادسازی زنگ‌نزن، میزان بازیابی کروم یا به‌عبارت دیگر مقدار کرومی که طی فرایند از دست نمی‌رود، اثر مستقیمی بر اقتصاد تولید دارد. فناوری‌های پیشرفته، به‌ویژه فرایندهای مبتنی بر خلأ، در سال‌های گذشته بازده کروم را بهبود داده‌اند. کروم عنصر اصلی تأمین‌کننده مقاومت به خوردگی در فولادهای زنگ‌نزن است و مقدار آن معمولاً از ۱۰ درصد وزنی بیشتر است. افزودن کروم به مذاب غالباً به شکل فروکروم انجام می‌شود. گریدهای مختلف فروکروم، از کمتر از ۰٫۱ تا حدود ۸ درصد وزنی کربن دارند؛ هرچه کربن فروکروم کمتر باشد، بهای آن بالاتر است. با وجود ضرورت دستیابی به کربن پایین برای مقاومت خوردگی مطلوب، بسیاری از فولادسازان برای کاهش هزینه از فروکروم پرکربن استفاده می‌کنند و سپس کربن اضافی را طی کربن‌زدایی حذف می‌کنند. اساس کربن‌زدایی، واردکردن اکسیژن و واکنش آن با کربن حل‌شده در مذاب فولاد است. تولید فولاد زنگ‌نزن معمولاً فرایندی دومرحله‌ای یا «دوپلکس» است: در مرحله نخست، قراضه ذوب می‌شود، فروکروم به کوره قوس الکتریکی (EAF) افزوده می‌شود و اکسیژن‌دمی با هدف کاهش کربن، بدون اکسایش قابل‌توجه کروم، انجام می‌گیرد.

در مرحله دوم، میزان کربن تا مقدار نهایی مورد نظر پایین آورده می‌شود. این کار در واحد کربن‌زدایی آرگون–اکسیژن (AOD) یا کربن‌زدایی اکسیژن در خلأ (VOD) انجام می‌شود؛ کاهش فشار جزئی مونوکسیدکربن در این فرایندها، اکسایش کربن را نسبت به اکسایش سایر عناصر ترجیح می‌دهد [۱–۹].

نتایج آزمایشگاهی نشان داده‌اند که تزریق CO هنگام ذوب و پالایش فولاد زنگ‌نزن می‌تواند سرعت کربن‌زدایی را افزایش دهد و کروم را بهتر حفظ کند؛ موضوعی که به بهبود بهره‌وری تولید می‌انجامد [۱]. مدل‌هایی برای استفاده از CO نیز با هدف بهینه‌سازی پارامترهای پالایش و کاهش هزینه مصرف فروسیلیسیم (FeSi) توسعه یافته‌اند [۲]. کنترل ترکیب سرباره در EAF علاوه بر محدودکردن اتلاف کروم، به کاهش انحلال MgO از نسوز کوره کمک می‌کند [۳]. ترمودینامیک محاسباتی، از تشکیل سرباره تا اکسایش و بازیابی کروم ــ به‌خصوص هنگام تخلیه مذاب ــ ابزار مناسبی برای شناخت رفتار فرایند است [۴]. افزایش کروم سرباره موجب تشکیل پوسته و لایه‌های سخت، کاهش واکنش‌پذیری و اختلال در تشکیل سرباره پفکی می‌شود؛ در نتیجه احیای سرباره دشوارتر خواهد شد. سرباره فولاد زنگ‌نزن که اکسید کروم زیادی داشته باشد، به‌آسانی قابل بازیافت نیست [۵، ۶].

در VOD، با دمیدن اکسیژن روی سطح فولاد مذاب در محیط خلأ، کربن به‌صورت انتخابی اکسید می‌شود. خلأ فشار جزئی CO را کاهش می‌دهد و خروج کربن را نسبت به اکسایش کروم تقویت می‌کند. گرچه دستیابی نظری به ۰٫۰۰۱ درصد وزنی کربن ممکن است، در عمل سرعت انتقال جرم حد نهایی فرایند را تعیین می‌کند [۷].

در AOD، آرگون برای رقیق‌سازی گاز و پایین‌آوردن فشار جزئی CO به کار می‌رود تا اکسایش کربن بر اکسایش کروم غلبه کند. احیا و بازیابی مؤثر کروم از سرباره از نظر حفظ منابع و پیشگیری از آلودگی اهمیت دارد. معمولاً از فروسیلیسیم برای بازگرداندن کروم اکسیدشده استفاده می‌شود، اما افزایش سیلیسیم فولاد، مصرف آن را محدود می‌کند [۸]. آلومینیوم از دیدگاه ترمودینامیکی احیاکننده بسیار مناسبی است، هرچند هزینه آن یک مانع به شمار می‌آید [۹].

در تولید فولادهای آلیاژی حاوی کروم، حدود ۹۷ درصد کل اتلاف کروم به مرحله کوره قوس الکتریکی نسبت داده شده است. با انتخاب روش مناسب ذوب، کنترل اکسایش مذاب زنگ‌نزن و احیای سرباره می‌توان این تلفات را کاهش داد و اقتصاد تولید را بهبود بخشید [۶، ۱۰–۱۳].

مطالعات مربوط به طرح‌های مختلف کوره قوس الکتریکی و پارامترهای مؤثر بر بازده کروم نشان داده‌اند که تخلیه از دهانه یا ناودان کوره (spout tapping) نسبت به تخلیه از کف ترجیح دارد؛ زیرا در حالت نخست، تماس و اختلاط سرباره با ماده احیاکننده بهتر انجام می‌شود [۱۰].

بررسی ریزساختاری سرباره دو گروه اصلی از فازهای حاوی اکسید کروم را نشان می‌دهد: کرومیت‌های کلسیم و

اسپینل‌های کرومیتی. تشکیل این فازها به ترکیب شیمیایی و بازیسیته سرباره وابستگی زیادی دارد. کرومیت‌های کلسیم بیشتر در بازیسیته بالا تشکیل می‌شوند، اما اسپینل‌های کرومیتی در گستره وسیع‌تری از بازیسیته پایدارند [۱۱].

آزمایش‌ها نشان می‌دهند که کاربید کلسیم (CaC) در مقایسه با احیاکننده‌های مرسوم، از جمله فروسیلیسیم و آلومینیوم، سرعت احیای بیشتر و بازیابی کلی بالاتری از کروم سرباره ایجاد می‌کند. CaC افزون بر احیای مؤثر Cr O به کروم فلزی، به تشکیل سرباره پفکی نیز کمک می‌کند و از این راه می‌تواند بازده فرایند را افزایش دهد [۱۲].

با این همه، همواره مقداری کروم در سرباره باقی می‌ماند که هم هزینه اقتصادی دارد و هم مسئله‌ای زیست‌محیطی است. برخی پژوهش‌ها بر احیای سرباره‌های کروم‌دار و بازده مواد احیاکننده متمرکز شده‌اند. در یکی از این مقایسه‌ها، آلومینیوم مؤثرترین احیاکننده بود، فروسیلیسیم در رتبه بعد قرار گرفت و گرافیت یا کربن کمترین کارایی را داشت [۱۳].

اهمیت فولادهای زنگ‌نزن باعث شده آثار فراوانی درباره ترمودینامیک اکسایش سامانه Fe–Cr–C و احیای اکسیدهای کروم منتشر شود. بااین‌حال، بررسی دقیق این منابع اختلاف‌ها و ناهمخوانی‌هایی در محاسبات ترمودینامیکی آشکار می‌کند. منشأ این اختلاف‌ها، انتخاب مقادیر متفاوت انرژی واکنش‌ها و تفسیرهای گوناگون از پدیده‌های ترمودینامیکی هنگام فولادسازی زنگ‌نزن است [۱، ۳، ۴، ۹، ۱۴–۱۷].

هدف اصلی این پژوهش، گردآوری و ارزیابی داده‌های علمی منتشرشده توسط پژوهشگران دیگر و به‌کارگیری آن‌ها در محاسبه اتلاف کروم طی تولید فولاد زنگ‌نزن است. نویسندگان همچنین می‌کوشند نقاط حساس فرایند را برای کاهش اتلاف کروم روشن کنند و بر مبنای آن‌ها، راهنمایی ترمودینامیکی برای عملیات تولید ارائه دهند.

۲. ویژگی‌های ترمودینامیکی اکسایش کروم و کربن

بیشترین اتلاف کروم در تولید فولاد زنگ‌نزن، هنگام ذوب قراضه در EAF رخ می‌دهد. منظور از «اتلاف» در اینجا اکسایش کروم است: اکسید کروم حاصل وارد سرباره می‌شود، در آن حل می‌شود و احیای دوباره‌اش دشوار است. اکسیژن می‌تواند از قراضه اکسیدشده یا مرطوب، نفوذ هوا از درِ کوره، اکسایش بیش‌ازحد مذاب یا حتی نسبت نامناسب گاز طبیعی به اکسیژن وارد فرایند شود [۳–۵، ۱۸، ۱۹]. واکنش اکسایش کروم در رابطه (۱) بیان شده است:

$$(Cr] + 3[O] \quad Cr_2O_3(s) \quad (1]2$$

فولاد زنگ‌نزن باید کربن پایینی داشته باشد و ساده‌ترین راه حذف کربن، اکسایش آن در مذاب است. واکنش اکسایش کربن حل‌شده در فولاد مذاب به‌صورت رابطه (۲) نوشته می‌شود:

$$(C] + [O] \quad CO(g) \quad (2]$$

در این محاسبات تعادلی، اکسیژن در روابط (۱) و (۲) به‌صورت اکسیژن حل‌شده در فولاد مذاب، یعنی [O]، نمایش داده می‌شود. هرچند منبع آن ممکن است گاز اکسیژنِ تزریق‌شده باشد، گونه‌ای که مستقیماً در سطح مشترک فلز وارد واکنش می‌شود، اکسیژن حل‌شده است. ترکیب این دو واکنش، تعادل کلی Cr–C–O را به دست می‌دهد که عناصر حل‌شده در مذاب را به محصول گازی CO پیوند می‌زند. بنابراین در جریان ذوب، هم کربن و هم کروم قابلیت اکسیدشدن دارند و اینکه کدام واکنش غالب شود، به فعالیت شیمیایی اجزا و شرایط کوره وابسته است. واکنش ترکیبی به شکل رابطه (۳) است:

$$(C] + Cr_2O_3(s) \quad 3CO(g) + 2[Cr] \quad (3]3$$

اکنون می‌توان تعادل میان اکسایش کروم و کربن را محاسبه کرد. جدول ۱ مقادیر آنتالپی استاندارد (H°)، آنتروپی استاندارد (S°) و انرژی آزاد گیبس استاندارد (G°) واکنش (۳) را در دمای ۱۸۷۳ کلوین، بر اساس منابع مختلف، مقایسه می‌کند [۱، ۴، ۹، ۱۴–۱۷، ۲۰، ۲۱]. در محاسبه انرژی آزاد گیبس، تعیین حالت اولیه و نهایی عناصر و ترکیب‌ها اهمیت بنیادی دارد؛ ازاین‌رو واکنش باید دقیق تعریف شود. در رابطه (۳)، کربن و کروم در آهن مذاب حل شده‌اند؛ بنابراین انرژی آزاد گیبسِ انحلال آن‌ها (G_{dis}) نیز باید منظور شود. برخی نویسندگان فقط آنتالپی و آنتروپی استاندارد تشکیل را لحاظ کرده‌اند [۴، ۹، ۱۶، ۲۰]؛ در مقابل، وانگ و همکاران [۱۵]، ما و همکاران [۱۷] و هایکینن و همکاران [۱۴] انرژی لازم برای حل‌شدن C و Cr در آهن را نیز در محاسبات گنجانده‌اند. در این پژوهش برای انرژی انحلال از داده‌های سیگورث و همکاران [۲۲] استفاده شده و نوع حالت استاندارد ــ رائولتی، هنری یا استاندارد یک درصد وزنی ــ نیز در نظر گرفته شده است.

منبع / سال انتشار	H° (J)	S° (J/K)	G° (J)
Kho و همکاران [۴] (۲۰۱۰)	77,000	133.48[۱]	-173,000
Carboni و همکاران [۱۶] (۲۰۱۱)	766,969	504.63	-178,203[۱]
Barin و همکاران [۲۰] (۱۹۹۵)	776,234	504.53	-168,751[۱]
HSC 8.0	773,918	502.40	-167,077[۱]
Sano [۹] (۲۰۰۴)	402,600	299.00	-157,427[۱]
Wang و همکاران [۱۵] (۲۰۱۳)	748,740[۲]	476.68[۲]	-144,081[۱،۲]
Ma و همکاران [۱۷] (۲۰۰۳)	734,782[۲]	469.95[۲]	-145,434[۱،۲]

منبع / سال انتشار	H° (J)	S° (J/K)	G° (J)
Mihara و همکاران [۲۱] (۲۰۱۶)	776,468[۱،۲]	486.25[۱،۲]	-134,278[۱،۲]
Heikkinen و همکاران [۱۴] (۲۰۱۰)	248,948[۱،۳]	201.88[۱،۳]	-129,173[۱،۳]
Thermo-Calc SSUB3	776,631	505.10	-169,417

۱: مقدار محاسبه‌شده. ۲: انحلال C و Cr در مبنای یک درصد وزنی لحاظ شده است. ۳: انحلال C و Cr در مبنای هنری لحاظ شده است.

در جدول ۱، مقادیری که از داده‌های منابع و با استفاده از واکنش (۳) محاسبه شده‌اند، با نشان‌های ۱، ۲ و ۳ مشخص شده‌اند. وانگ و همکاران [۱۵] و ما و همکاران [۱۷] هنگام محاسبه انرژی آزاد گیبس، انرژی انحلال کربن و کروم جامد را لحاظ کرده‌اند و حالت استاندارد یک درصد وزنی را مبنا گرفته‌اند. هایکینن و همکاران [۱۴] نیز انرژی انحلال این دو عنصر را در نظر گرفته‌اند، با این تفاوت که برای کروم از انحلال حالت مایع و برای محاسبه از حالت استاندارد هنری استفاده کرده‌اند. جدول ۲ آنتالپی انحلال (H_{dis})، آنتروپی انحلال (S_{dis}) و انرژی آزاد گیبسِ محاسبه‌شده برای رقت بی‌نهایت کربن و کروم در آهن مایع را در دمای ۱۸۷۳ کلوین نشان می‌دهد. در محاسبات از پایگاه داده HSC 8.0 و نرم‌افزار Thermo-Calc نسخه 2022a با پایگاه داده TCFE12 استفاده شده است.

واکنش انحلال در آهن مایع	H_{dis} (J)	S_{dis} (J/K)	G_{dis} (J)
[C] = [C(s)]؛ استاندارد ۱ wt.%	22,594	42.26	-56,559[۱]
[Cr] = [Cr(s)]؛ استاندارد ۱ wt.%	19,246	46.86	-68,523[۱]
[Cr] = [Cr(l)]؛ استاندارد ۱ wt.%	0	37.70	-70,612[۱]
[C] = [C(s)]؛ استاندارد هنری	22,594	16.74	-8,760[۱]
[Cr] = [Cr(s)]؛ استاندارد هنری	19,246	9.16	2,089[۱]
[Cr] = [Cr(l)]؛ استاندارد هنری	0	0	0[۱]

۱: مقدار محاسبه‌شده.

برای محاسبه انرژی آزاد گیبس واکنش (۳)، ثابت تعادل K نیز باید منظور شود. با افزودن جمله مربوط به تعادل و انرژی انحلال، روابط (۴) و (۵) به دست می‌آیند. در این روابط، T دما، R ثابت جهانی گازها، K ثابت تعادل واکنش (۳)، p_{CO} فشار جزئی مونوکسیدکربن و a_C، a_{Cr} و $a_{Cr\ O}$ به‌ترتیب فعالیت کروم، کربن و اکسید کروم هستند.

$$\Delta G = \Delta H^\circ - T\cdot \Delta S^\circ + \Delta G_{dis} + R\cdot T\cdot \ln(K_3) \quad (4)$$

$$K_3 = (p_{CO}^{3} \cdot a_{Cr}^{2}) / (a_C^{3} \cdot a_{Cr\,O}) \quad (5)$$

در مذاب‌های چندجزئی، مانند فولادهای آلیاژی، حضور عناصر آلیاژی بر ضریب فعالیت جزء حل‌شده i اثر می‌گذارد؛ این اثر را می‌توان با صورت‌بندی واگنر توصیف کرد. فعالیت عناصر با حالت‌های استاندارد مختلف قابل محاسبه است. اگر حالت استاندارد یک درصد وزنی مبنا باشد، صورت‌بندی واگنر به شکل روابط (۶) و (۷) نوشته می‌شود [۲۳]:

$$a_i^{\%} = f_i \cdot [\text{wt.\% i}] \quad (6)$$

$$\log(f_i) = e_i^{i}\cdot[\text{wt.\% i}] + \sum_{j=2}^{m} e_i^{j}\cdot[\text{wt.\% j}] \quad (7)$$

در این روابط، $a_i^{\%}$ فعالیت عنصر i نسبت به حالت استاندارد یک درصد وزنی و f_i ضریب فعالیت آن است. عبارت‌های [wt.% i] و [wt.% j] درصد وزنی عناصر حل‌شده i و j را بیان می‌کنند. پارامتر e_i^{i} ضریب خودبرهم‌کنش مرتبه اول است و اثر عنصر i بر فعالیت خود را نشان می‌دهد. به همین ترتیب، e_i^{j} پارامتر برهم‌کنش متقابل مرتبه اول است و اثر عنصر آلیاژی j را بر فعالیت i در آهن مذاب رقیق بیان می‌کند. مقادیر پارامترهای ویژه برهم‌کنش میان C و Cr در منابع مختلف متفاوت‌اند و در جدول ۳ گردآوری شده‌اند [۵، ۱۹، ۲۲، ۲۴–۲۶].

پارامتر	[Sigworth [۲۲	[Ghosh [۵	[Lupis [۲۴	[Seetharaman [۱۹	[JSPS [۲۵	[Total Materia [۲۶
e_C^{C}	0.14	0.243	0.22	0.14 / 0.243	0.243	0.14
e_C^{Cr}	-0.024	-0.023	-0.024	-0.023	-0.023	-0.024
e_{Cr}^{Cr}	-0.0003	-0.0003	—	-0.0003	-0.0003	0.0003
e_{Cr}^{C}	-0.12	-0.114	-0.118	-0.114	-0.114	0.12

خط تیره: منبع مربوط برای آن پارامتر مقداری ارائه نکرده است.

شکل ۱، حلالیت تعادلی کربن و کروم در آهن مذاب را با استفاده از داده‌های مختلف انرژی آزاد گیبس در جدول ۱ نشان می‌دهد. برای محاسبه حلالیت، افزون بر مقادیر جدول، انرژی انحلال عناصر از حالت جامد به حالت حل‌شده در آهن مایع، بر مبنای حالت استاندارد یک درصد وزنی، لحاظ شده است. هرچه مجموع انرژی آزاد گیبس افزایش یابد، حلالیت تعادلی کروم در آهن مذاب کاهش پیدا می‌کند. برای نمونه، در دمای ۱۶۰۰ درجه سلسیوس و کربن ۰٫۸ درصد وزنی، مقدار تعادلی کروم طبق محاسبات کاربونی و همکاران [۱۶] برابر ۲۲٫۳۵ درصد وزنی و طبق هایکینن و همکاران [۱۴] برابر ۱۶٫۸۵ درصد وزنی است. برای ادامه محاسبات از داده‌های آنتالپی و آنتروپی پایگاه HSC 8.0 استفاده شده است؛ منحنی حاصل در حدود میانگین نتایج قرار می‌گیرد و در شرایط یادشده، مقدار تعادلی کروم را ۱۹٫۶۰ درصد وزنی به دست می‌دهد.

SteelExperts.ir

شکل ۱. حلالیت تعادلی کروم و کربن در آهن مذاب با مقادیر مختلف انرژی آزاد گیبس؛ اقتباس از منابع [۴، ۹، ۱۴–۱۷، ۲۰، ۲۱].

این شکل از پژوهش‌های پیشین اقتباس شده و مجوز بازنشر تصویر اصلی در آرشیو مشخص نیست؛ برای مشاهده تصویر به نسخه اصلی مقاله نزد ناشر مراجعه کنید.

شکل ۲ منحنی‌های تعادلی C و Cr را در ۱۶۰۰ درجه سلسیوس با استفاده از انرژی آزاد گیبس HSC 8.0 و مجموعه‌های متفاوت پارامترهای برهم‌کنش نشان می‌دهد. همان‌گونه که جدول ۳ نیز آشکار می‌کند، نویسندگان مختلف برای این پارامترها به اعداد یکسانی نرسیده‌اند و انتخاب هر مجموعه، شیب منحنی تعادلی متفاوتی ایجاد می‌کند. بیشترین حلالیت تعادلی کروم با پارامترهای گزارش‌شده توسط گوش و همکاران [۵]، سیتارامان و همکاران [۱۹] و JSPS [۲۵] به دست آمده و کمترین مقدار مربوط به مجموعه Total Materia ۲۶]] است. در ادامه پژوهش از پارامترهای سیگورث و همکاران [۲۲] استفاده شده است که منحنی آن‌ها تقریباً در میانه نتایج قرار می‌گیرد.

شکل ۲. حلالیت تعادلی کروم و کربن در آهن مذاب با مجموعه‌های متفاوت پارامترهای برهم‌کنش؛ اقتباس از منابع [۵، ۱۹، ۲۲، ۲۴–۲۶].

این شکل از پژوهش‌های پیشین اقتباس شده و مجوز بازنشر تصویر اصلی در آرشیو مشخص نیست؛ برای مشاهده تصویر به نسخه اصلی مقاله نزد ناشر مراجعه کنید.

در عملیات متالورژی، محاسبه فعالیت بر پایه حالت استاندارد یک درصد وزنی کاربردی است؛ زیرا غلظت عناصر معمولاً به‌صورت درصد وزنی گزارش می‌شود و نیازی به تبدیل مقیاس نیست. بااین‌حال، محاسبات دقیق‌تر مستلزم استفاده از کسر مولی X است. واگنر [۲۳] و پس از او لوپیس و الیوت [۲۷] صورت‌بندی روابط (۸) و (۹) را برای ضریب فعالیت پیشنهاد کردند. در این روابط، a_i^H و $_i$ فعالیت و ضریب فعالیت عنصر i در حالت استاندارد هنری، $_i^\circ$ ضریب فعالیت مرتبه صفر، $_i^j$ پارامتر برهم‌کنش مرتبه اول در مقیاس کسر مولی و X_i و X_j کسر مولی عناصر i و j هستند. پارامتر $_i^j$ را می‌توان از پارامتر متناظر در حالت استاندارد یک درصد وزنی، به کمک رابطه (۱۰)، محاسبه کرد [۲۲، ۲۷]. در این رابطه M_j جرم مولی عنصر j، M جرم مولی حلال و e_i^j پارامتر برهم‌کنش مرتبه اول در مبنای یک درصد وزنی است.

$$(a_i^H = {}_i \cdot X_i \quad (8$$

$$(\ln({}_i) = \ln({}_i^\circ) + \sum_{j=2}^{m} {}_i^j \cdot X_j \quad (9$$

$$({}_i^j = 230\cdot(M_j/M_1)\cdot e_i^j + (M_1-M_j)/M_1 \quad (10$$

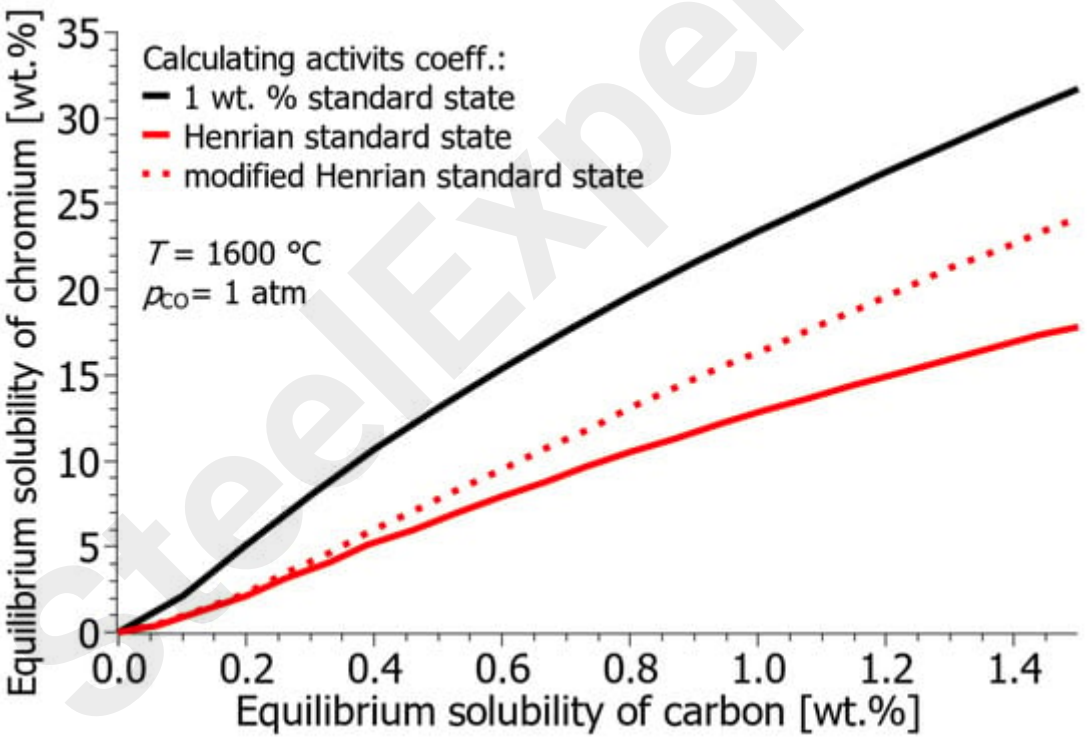
رابطه (۹) رفتار محلول‌های رقیقِ تابع قانون هنری را به‌خوبی توصیف می‌کند؛ اما با افزایش غلظت عناصر آلیاژی، فعالیت و ضریب فعالیت از این تقریب فاصله می‌گیرند. به همین دلیل، پلتون و بیل [۲۸، ۲۹] و ما و همکاران [۱۷] پیشنهاد کردند اثر ضریب فعالیت حلال، $_{sol}$ ، نیز به صورت‌بندی برهم‌کنش افزوده شود. این

اصلاح، محاسبه فعالیت در غلظت‌های بالاتر را دقیق‌تر می‌کند و به روابط (۱۱) و (۱۲) می‌انجامد.

$$\ln(\gamma_i) = \ln(\gamma_i^{\circ}) + \ln(\gamma_{sol}) + \sum_{j=1}^{m} \varepsilon_i^j \cdot X_j \quad (11)$$

$$\log(\gamma_{sol}) = -\tfrac{1}{2} \left[\sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{m} \varepsilon_i^j \cdot X_i \cdot X_j\right] \quad (12)$$

شکل ۳ منحنی‌های تعادلی کروم و کربن را در آهن مذاب برای سه روش محاسبه ضریب فعالیت نشان می‌دهد: حالت استاندارد یک درصد وزنی، حالت هنری و حالت هنری اصلاح‌شده. نتیجه هر روش پس از محاسبه به درصد وزنی تبدیل شده است. روش یک درصد وزنی در مقایسه با محاسبه بر مبنای کسر مولی، حلالیت بالاتری برای کروم پیش‌بینی می‌کند. در غلظت‌های پایین کربن، تا حدود ۰٫۲ درصد وزنی، اختلاف دو روش مبتنی بر کسر مولی ناچیز است؛ اما با افزایش کربن، روش لحاظ‌کننده ضریب فعالیت حلال رشد سریع‌تری در حلالیت تعادلی کروم نشان می‌دهد. نویسندگان نتوانستند رابطه مستقیم حلالیت کربن و کروم را در Thermo-Calc استخراج کنند، زیرا داده‌ها محافظت‌شده‌اند و چنین نمایشی در نرم‌افزار ممکن نیست.



شکل ۳. حلالیت تعادلی کروم و کربن در آهن مذاب با انتخاب حالت‌های استاندارد متفاوت. منبع: Bajželj و Burja، Metals (2025)، مجوز CC BY 4.0.

شکل‌های ۴-الف و ۴-ب، وابستگی فعالیت کربن و کروم به کسر مولی آن‌ها را در محلول آهن با ۱۵ درصد وزنی Cr یا یک درصد وزنی C در دمای ۱۶۰۰ درجه سلسیوس نشان می‌دهند. فعالیت‌ها با حالت‌های استاندارد رائولتی، هنری و یک درصد وزنی محاسبه شده‌اند. در مدل اصلاحی پلتون و بیل [۲۸، ۲۹] و ما و همکاران [۱۷]، اثر فعالیت حلال نیز منظور شده است. نمودارها همچنین مقادیر محاسبه‌شده با Thermo-Calc و پایگاه

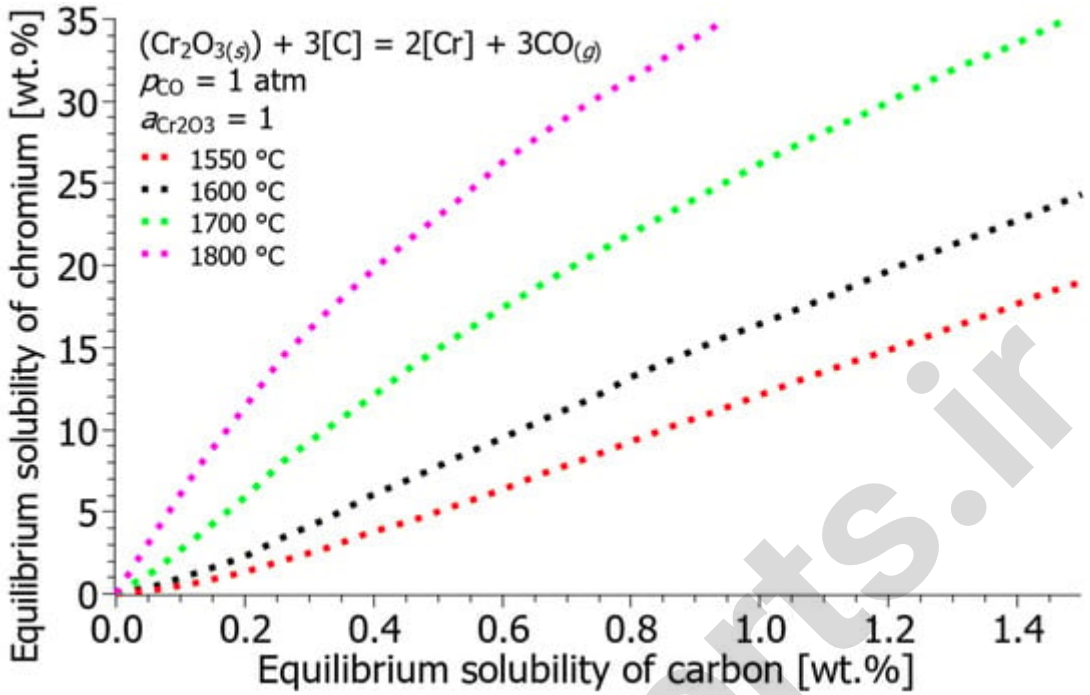
TCFE12 را در بر می‌گیرند. تعیین فعالیت کربن در مذاب، چنان‌که خروجی Thermo-Calc نیز نشان می‌دهد، دشوار است. روش استاندارد یک درصد وزنی، فعالیت را با دقت بسیار پایینی برآورد می‌کند؛ زیرا فعالیت هر دو عنصر حتی در غلظت‌های کم، به‌شدت افزایش می‌یابد. نتایج مدل‌های دیگر به یکدیگر نزدیک‌ترند.

شکل ۴. الف) فعالیت کربن در آهن حاوی ۱۵ درصد وزنی کروم؛ ب) فعالیت کروم در آهن حاوی یک درصد وزنی کربن؛ داده‌های اقتباس‌شده از منابع [۱۷، ۲۹].

این شکل از پژوهش‌های پیشین اقتباس شده و مجوز بازنشر تصویر اصلی در آرشیو مشخص نیست؛ برای مشاهده تصویر به نسخه اصلی مقاله نزد ناشر مراجعه کنید.

از شکل‌های ۳ و ۴ می‌توان دریافت که کاهش حلالیت کربن با کاهش حلالیت کروم همراه است. از دیدگاه عملیات اکسایش، این بدان معناست که با سوختن کربن، بخشی از کروم نیز اکسید می‌شود. فولاد زنگ‌نزن معمولاً به کربن بسیار پایین نیاز دارد؛ رسیدن به این مقدار به اکسایش شدیدتر نیاز دارد و خطر اتلاف کروم را افزایش می‌دهد. با انتخاب مناسب دما و شیوه اکسایش می‌توان این اتلاف را محدود کرد. برای تعیین پنجره عملیاتیِ کم‌اتلاف، نویسندگان حلالیت تعادلی کروم و کربن را بر حسب دما، فعالیت اکسید کروم، فشار جزئی CO و فعالیت سایر عناصر حل‌شده در مذاب محاسبه کرده‌اند. محاسبات بعدی با داده‌های آنتالپی و آنتروپی HSC 8.0 و پارامترهای برهم‌کنش $^{j}_{i}$ و انرژی انحلال برگرفته از سیگورث و همکاران [۲۲] انجام شده است.

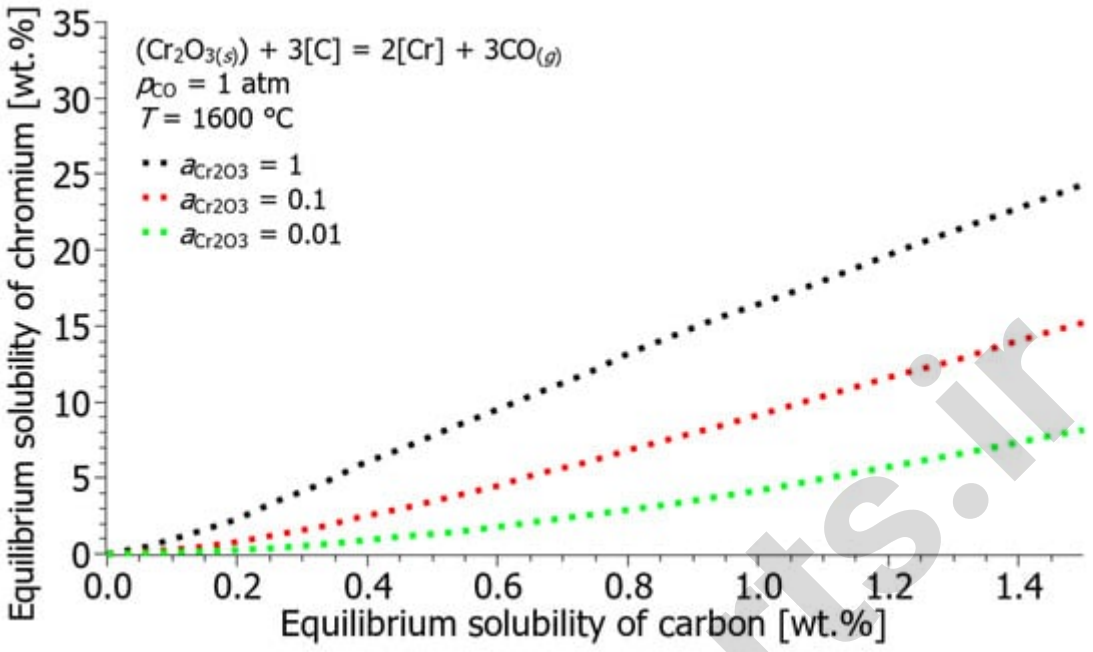
شکل ۵ منحنی‌های حلالیت تعادلی کروم و کربن را در گستره دمایی ۱۵۵۰ تا ۱۸۰۰ درجه سلسیوس نشان می‌دهد. با افزایش دما، غلظت تعادلی کربن کاهش می‌یابد. این رفتار از نظر ترمودینامیکی قابل انتظار است؛ زیرا در دمای بالاتر فاز گازی CO پایدارتر می‌شود، درحالی‌که اکسیدهای فلزی مانند Cr_2O_3 پایداری کمتری دارند و به حالت‌های اکسایش پایین‌تر تجزیه می‌شوند. در مذابی با ۱۵ درصد وزنی کروم، مقدار تعادلی کربن در ۱۵۵۰ درجه سلسیوس، ۱٫۲۱ درصد وزنی و در ۱۸۰۰ درجه سلسیوس، ۰٫۲۸ درصد وزنی است. بنابراین برای کاهش اتلاف کروم، کربن‌زدایی فولادهای پرکروم در EAF بهتر است در دمای بالا انجام شود. هنگام ذوب قراضه‌ای که از ابتدا کروم زیادی دارد نیز باید از اکسایش ناخواسته جلوگیری کرد.



شکل ۵. حلالیت تعادلی کروم و کربن در آهن مذاب در گستره دمایی ۱۵۵۰ تا ۱۸۰۰ درجه سلسیوس. منبع: Bajželj و Burja، Metals (2025)، مجوز CC BY 4.0.

شکل ۶ اثر فعالیت اکسید کروم بر غلظت‌های تعادلی C و Cr را نشان می‌دهد. با افزایش سهم اکسید کروم در سرباره، فعالیت آن افزایش می‌یابد تا زمانی که فاز جامد رسوب کند و فعالیت به یک برسد. در فعالیت پایین‌تر اکسید کروم، حلالیت تعادلی کروم در آهن مذاب کمتر است؛ ازاین‌رو در مراحل ابتدایی اکسایش مذاب، هرچه فعالیت اکسید کروم پایین‌تر باشد، اکسایش کروم شدیدتر خواهد بود. در ۱۶۰۰ درجه سلسیوس و غلظت ۱۵ درصد وزنی کروم، برای فعالیت اکسید کروم برابر ۰/۰۱، کربن تعادلی ۲/۲۴ درصد وزنی است؛ درحالی‌که در فعالیت یک، مقدار کربن تعادلی به ۰/۹۱ درصد وزنی می‌رسد.

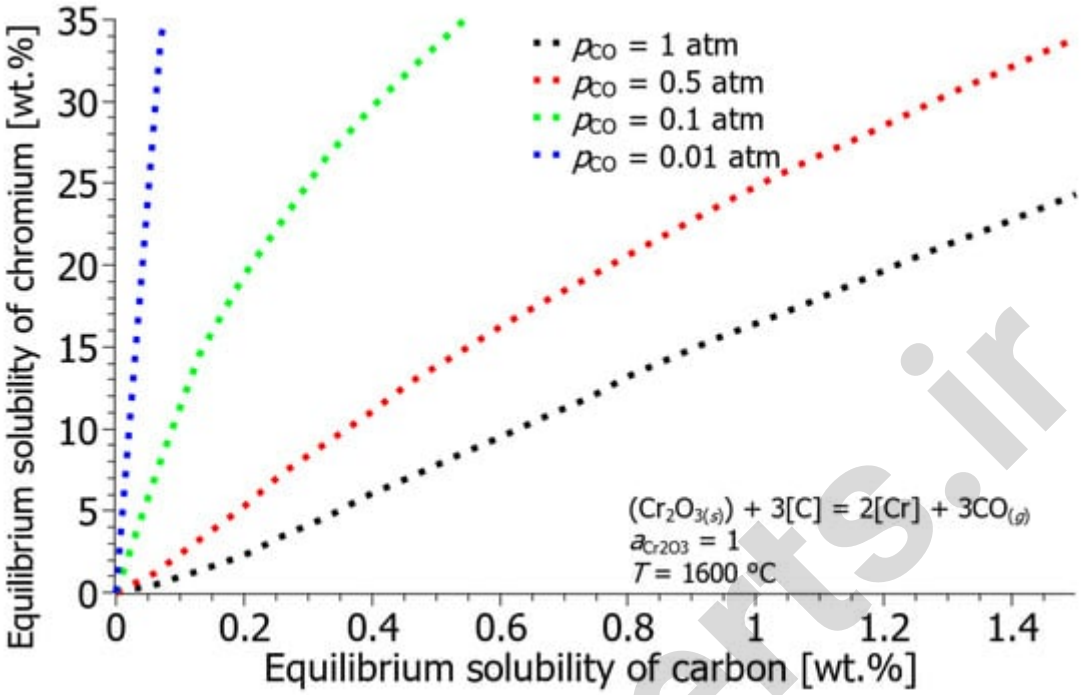
SteelExperts.ir



شکل ۶. حلالیت تعادلی کروم و کربن در آهن مذاب در فعالیت‌های متفاوت اکسید کروم. منبع: Bajželj و Burja، Metals (2025)، مجوز CC BY 4.0.

شکل ۷ نشان می‌دهد که فشار جزئی مونوکسیدکربن چگونه بر حلالیت تعادلی C و Cr اثر می‌گذارد. خروج پیوسته محصول گازی از سامانه، که با کاهش فشار به دست می‌آید، واکنش (۳) را به سمت تولید گاز سوق می‌دهد. در نتیجه، پایین‌آوردن فشار جزئی CO اکسایش کربن را تقویت می‌کند و حلالیت کروم در آهن مذاب را بالا می‌برد. در کوره قوس الکتریکی امکان کنترل فشار گاز بالای سطح مذاب به این شیوه وجود ندارد، اما همین اصل در مراحل بعدی پالایش، یعنی VOD و AOD، استفاده می‌شود. مطابق شکل ۷ با کاهش p_{CO}، حلالیت تعادلی کروم به‌شدت افزایش می‌یابد و به همین دلیل اکسایش کربن در این مراحل بسیار سریع و مؤثر است.

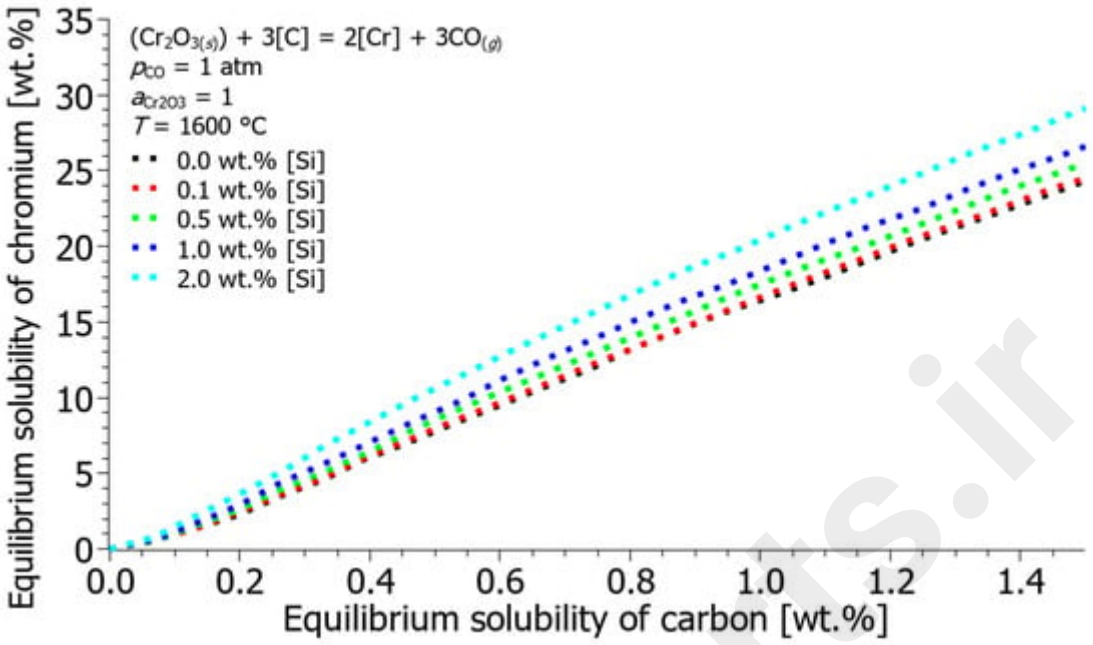
SteelExperts.ir



شکل ۷. حلالیت تعادلی کروم و کربن در آهن مذاب بر حسب فشار جزئی مونوکسیدکربن. منبع: Bajželj و Burja، Metals (2025)، مجوز CC BY 4.0.

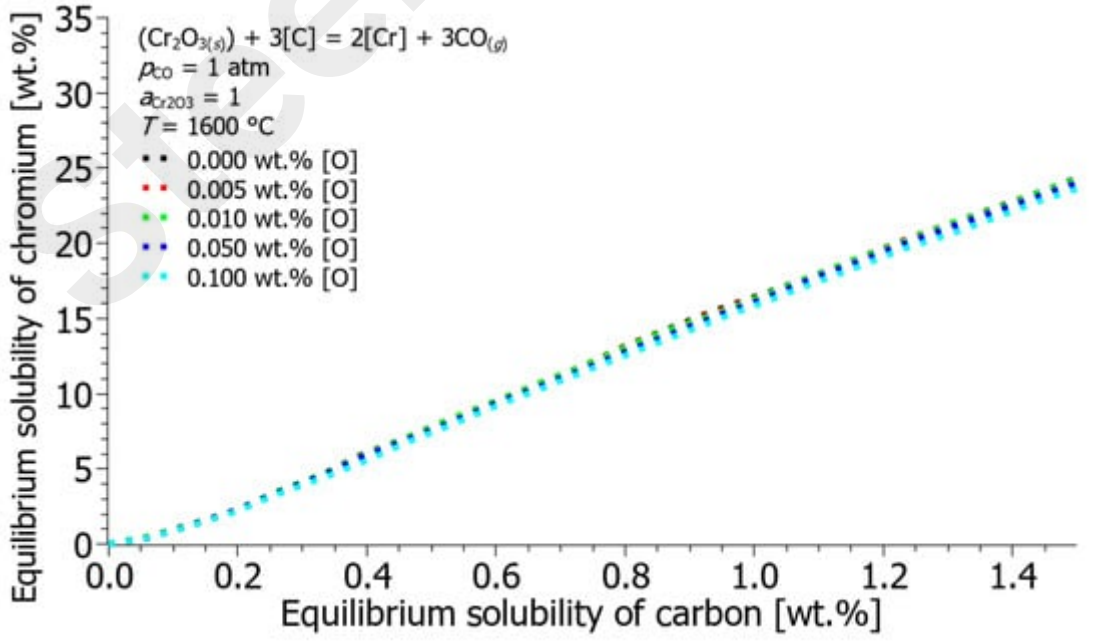
بر پایه صورت‌بندی واگنر، افزودن عناصر آلیاژی به محلول می‌تواند مستقیماً فعالیت سایر عناصر را تغییر دهد. سیلیسیم بر فعالیت کربن اثر مثبت دارد (e_C^{Si} = ۰٫۰۸) و فعالیت کروم را اندکی کاهش می‌دهد (e_{Cr}^{Si} = [۰٫۰۰۴۳-] [۲۲]). بنابراین افزایش سیلیسیم در آهن مذاب، از یک سو فعالیت کربن را بالا می‌برد و از سوی دیگر فعالیت کروم را پایین می‌آورد؛ حاصل آن افزایش حلالیت کروم و جابه‌جایی تعادل واکنش (۳) به سمت اکسایش کربن است. شکل ۸ اثر غلظت سیلیسیم را بر حلالیت تعادلی این دو عنصر نشان می‌دهد. در دمای ۱۶۰۰ درجه سلسیوس و ۱۵ درصد وزنی Cr، غلظت تعادلی کربن در حضور ۲ درصد وزنی Si برابر ۰٫۷۲ درصد وزنی است؛ این مقدار در غیاب سیلیسیم ۰٫۹۱ درصد وزنی خواهد بود.

SteelExperts.ir



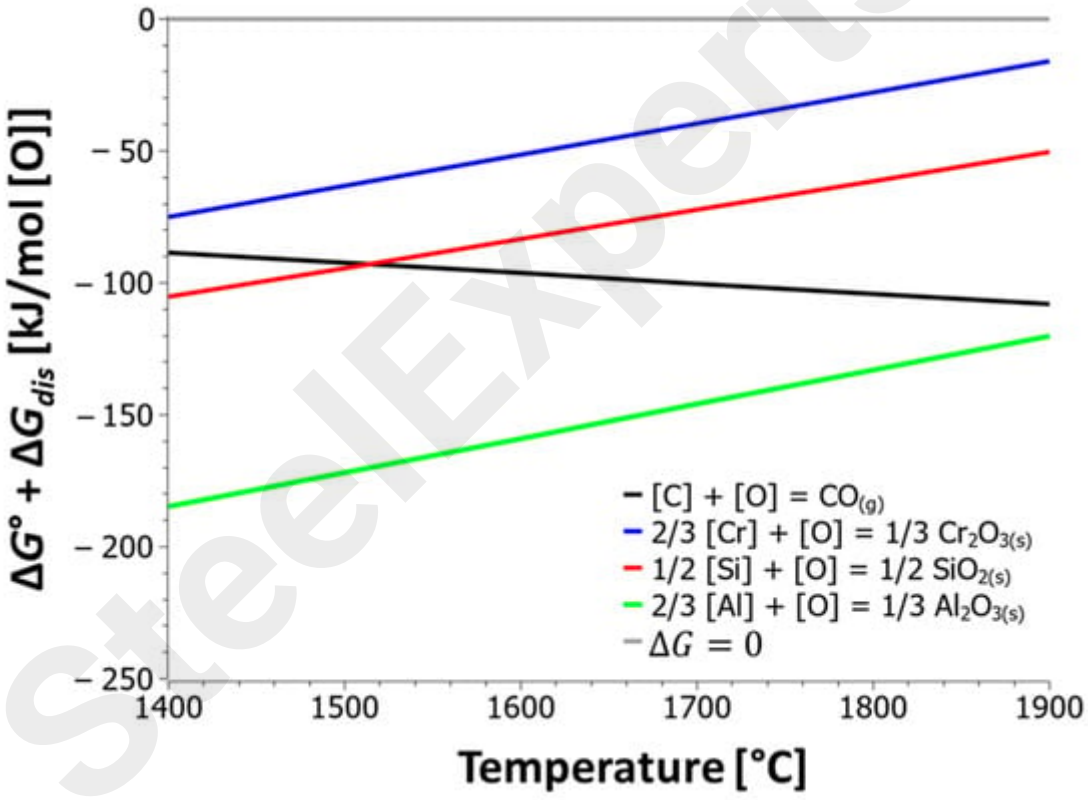
شکل ۸. غلظت‌های تعادلی کروم و کربن در آهن مذاب با مقدار متفاوت سیلیسیم در دمای ۱۶۰۰ درجه سلسیوس. منبع: Bajželj و Burja، Metals (2025)، مجوز CC BY 4.0.

پارامتر برهم‌کنش اکسیژن با کربن و کروم در هر دو مورد منفی و از یک مرتبه است: e_C^O = -۰٫۳۴ و e_{Cr}^O = -۰٫۱۴ [۲۲]. ازاین‌رو، افزودن اکسیژن از مسیر اثر بر ضرایب فعالیت، تغییر چشمگیری در نسبت حلالیت تعادلی کربن و کروم ایجاد نمی‌کند. شکل ۹ منحنی‌های محاسبه‌شده تعادل کروم و کربن را در غلظت‌های متفاوت اکسیژن محلول نشان می‌دهد.



شکل ۹. غلظت‌های تعادلی کروم و کربن در آهن مذاب با مقدار متفاوت اکسیژن در دمای ۱۶۰۰ درجه سلسیوس. منبع: Bajželj و Burja، Metals (2025)، مجوز CC BY 4.0.

افزون بر پارامترهای برهم‌کنش و فعالیت عناصر حل‌شده، باید واکنش‌های اکسایش سایر عناصر و انرژی آزاد گیبس آن‌ها نیز بررسی شود. شکل ۱۰ تغییر انرژی آزاد گیبس اکسایش عناصر آلیاژی مختلف را بر حسب دما نشان می‌دهد. داده‌های واکنش‌ها از منابع علمی گردآوری شده است؛ برای انرژی‌های آزاد استاندارد از HSC 8.0 و برای انرژی آزاد انحلال از داده‌های سیگورث و همکاران [۲۲] استفاده شده است. این نمودار نشان می‌دهد که با افزایش دما، اکسایش کربن مطلوب‌تر می‌شود؛ نتیجه‌ای که با شکل ۵ هم‌خوانی دارد. بنابراین انجام کربن‌زدایی فولاد زنگ‌نزن در دمای بالا توصیه می‌شود. انرژی آزاد گیبس اکسایش سیلیسیم و آلومینیوم از اکسایش کروم پایین‌تر است؛ حضور Si و Al حل‌شده، اکسایش کروم را محدود می‌کند. البته شکل ۱۰ فقط رابطه دما و انرژی آزاد گیبس را نمایش می‌دهد و در اصل درباره میل نسبی عناصر به اکسیژن است؛ برای محاسبه دقیق‌تر، فعالیت واقعی عناصر محلول نیز باید لحاظ شود.



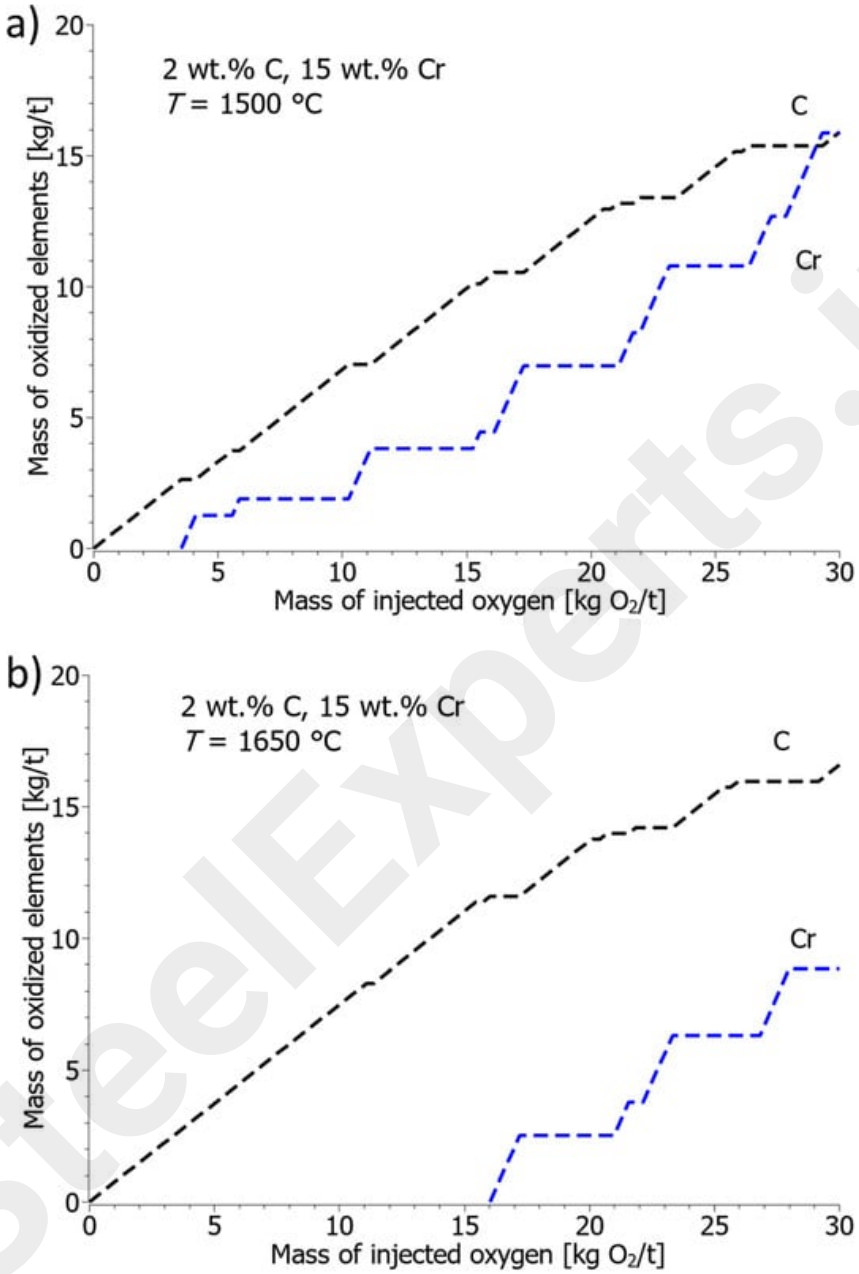
شکل ۱۰. تغییر انرژی آزاد گیبس واکنش اکسایش عناصر آلیاژی در آهن مذاب بر حسب دما. منبع: Bajželj و Burja، Metals (2025)، مجوز CC BY 4.0.

از این محاسبات می‌توان راهنمای عملی برای ذوب فولادهای پرکروم به دست آورد. در آغاز فرایند، دما و فعالیت اکسید کروم سرباره پایین است و خطر اکسایش کروم بالاست. برای حفاظت از قراضه می‌توان کربن، به‌ویژه آنتراسیت، سیلیسیم و آلومینیوم افزود و با تنظیم مناسب CaO و MgO، بازیسیته، گرانروی و سازگاری سرباره با نسوز را کنترل کرد [۲، ۳، ۱۰، ۳۰]. همچنین باید دسترسی اکسیژن محدود شود؛ به همین دلیل، نویسندگان توصیه می‌کنند مرحله ذوب با مشعل‌های گاز طبیعی انجام نشود. چیدمان دقیق سبدهای شارژ نیز مؤثر است؛

تا حد امکان بهتر است قراضه‌های کم‌کروم در سبدهای ابتدایی قرار گیرند. مطابق شکل ۵ با افزایش دمای مذاب، حلالیت کروم بالا می‌رود؛ پس کربن‌زدایی بهتر است در بیشترین دمای عملیِ ممکن ــ معمولاً بالاتر از ۱۶۵۰ درجه سلسیوس ــ صورت گیرد. در پایان مرحله کربن‌زدایی EAF نباید کربن بیش‌ازحد کاهش یابد، زیرا اکسایش کروم نیز هم‌زمان رخ می‌دهد. کربن‌زدایی در فشار جزئی پایین CO مؤثرتر است، اما تأمین آن عملاً به تجهیزاتی مانند VOD و AOD مربوط می‌شود. برای کنترل پویای سرعت کربن‌زدایی می‌توان ترکیب گاز خروجی را تحلیل کرد. اِخترهوف و همکاران [۳۰] سرعت کربن‌زدایی را از روی سهم CO در گازهای خروجی برآورد کرده‌اند: ابتدا همراه با افزایش اکسیژن‌دمی، سهم CO بالا می‌رود؛ این مرحله با اکسایش سیلیسیم و افزایش آهنگ اکسایش کربن مرتبط است. سپس کربن‌زدایی شدید رخ می‌دهد و مقدار CO به ناحیه تقریباً ثابت یا فلات می‌رسد. کاهش سهم CO پس از این مرحله، به افت سرعت کربن‌زدایی و افزایش فعالیت کروم نسبت داده می‌شود و نشانه آغاز اکسایش شدیدتر کروم است؛ در این نقطه باید اکسیژن‌دمی متوقف شود. اجرای چنین روش‌های ساده‌ای در کارخانه‌ها اتلاف کروم، مصرف اکسیژن و زمان تولید را کاهش داده است.

نویسندگان با استفاده از داده‌های HSC 8.0 و پارامترهای سیگورث و همکاران [۲۲] مدلی برای شبیه‌سازی کربن‌زدایی و اکسایش عناصر آلیاژی در فولاد زنگ‌نزن ساخته‌اند که بخشی از آن پیش‌تر منتشر شده بود [۳۱]. این مدل تغییر ترکیب مذاب بر اثر دمش اکسیژن را پیش‌بینی می‌کند و رقابت هم‌زمان اکسایش کربن، کروم و سیلیسیم را در نظر می‌گیرد. مبنای محاسبه، کمینه‌کردن انرژی آزاد گیبس کل سامانه است. برای بیان رفتار غیرایده‌آل عناصر حل‌شده، فعالیت آن‌ها با پارامترهای برهم‌کنش مرتبه اول برگرفته از منابع علمی محاسبه می‌شود. مدل در هر گام، مطلوب‌ترین واکنش ترمودینامیکی را مشخص می‌کند و مسیر پیشرفت اکسایش و شرایط کاهش اتلاف کروم به سرباره را به دست می‌دهد. شکل‌های ۱۱-الف تا ۱۱-ج جرم اکسیدشده C، Cr و Si را برای مذابی با ۱۵ درصد وزنی کروم و ۲ درصد وزنی کربن نشان می‌دهند. در حالت الف، دمای آغاز اکسایش ۱۵۰۰ درجه سلسیوس است: ابتدا کربن اکسید می‌شود و پس از دمش بیش از ۳٫۵ کیلوگرم اکسیژن به ازای هر تن فولاد، اکسایش کروم نیز شروع می‌شود. با ۲۰ کیلوگرم اکسیژن به ازای هر تن، ۷ کیلوگرم کروم و ۱۳ کیلوگرم کربن در هر تن اکسید می‌شوند. در حالت ب، دمای شروع ۱۶۵۰ درجه سلسیوس است؛ دمای بالاتر باعث می‌شود اکسایش کربن مدت بیشتری بدون اتلاف شدید کروم ادامه یابد و اکسایش کروم پس از عبور اکسیژن تزریقی از ۱۶ کیلوگرم بر تن آغاز شود. در دمش ۲۰ کیلوگرم بر تن، ۲٫۵ کیلوگرم کروم و ۱۳٫۵ کیلوگرم کربن در هر تن اکسید می‌شوند. در حالت ج، به مذاب ۱۵۰۰ درجه سلسیوسی ۰٫۵ درصد وزنی سیلیسیم افزوده شده است. در این شرایط، با وجود دمای پایین، اکسایش کروم تا تزریق بیش از ۱۷ کیلوگرم اکسیژن در هر تن به تعویق می‌افتد. ابتدا سیلیسیم اکسید می‌شود و سپس مرحله شدیدتر اکسایش کربن رخ می‌دهد. در دمش ۲۰ کیلوگرم بر تن، مقدار عناصر اکسیدشده به‌ترتیب ۰٫۳ کیلوگرم کروم، ۱۲ کیلوگرم کربن و ۳ کیلوگرم سیلیسیم در هر تن فولاد است. پیش‌بینی مدل با محاسبات اِخترهوف و همکاران [۳۰] هم‌خوانی نسبی دارد و دو پیام اصلی را تأیید می‌کند: برای کربن‌زدایی مؤثر با اتلاف اندک کروم، دمای بالا لازم است و در دمای پایین می‌توان به کمک

افزودن سیلیسیم از کروم محافظت کرد.



شکل ۱۱. اکسایش کربن، کروم و سیلیسیم در مذاب با ۱۵ درصد وزنی کروم و ۲ درصد وزنی کربن: الف) آغاز در ۱۵۰۰ درجه، ب) آغاز در ۱۶۵۰ درجه و ج) آغاز در ۱۵۰۰ درجه با افزودن ۰٫۵ درصد وزنی سیلیسیم. منبع: Bajželj و 2025) Burja، Metals)، مجوز CC BY 4.0.

سرباره نیز نقش مهمی در کاهش اتلاف کروم دارد. به‌طور کلی، سرباره از مذاب در برابر اکسایش، اتلاف گرما و خروج مواد محافظت می‌کند و می‌تواند بازده مصرف برق و بهره‌وری عملیات را افزایش دهد. تشکیل سرباره پفکی این مزایا را تقویت می‌کند؛ ولی اکسیدهای کروم، تولید چنین سرباره‌ای را در فولادسازی زنگ‌نزن دشوار می‌سازند. تا غلظت حدود ۸ درصد وزنی اکسید کروم، اختلاف چشمگیری مشاهده نمی‌شود؛ اما در غلظت‌های بالاتر از ۱۳ درصد وزنی، با افزایش سهم ذرات جامد، رفتار گرانروی سرباره تغییر می‌کند و به گفته منبع، گرانروی

کاهش می‌یابد. با افزایش غلظت اکسید کروم، شاخص پف‌کنندگی کم می‌شود و تشکیل سرباره پفکی سخت‌تر خواهد شد. مانع دیگر، FeO پایین سرباره است که سرعت تشکیل CO گازی و در نتیجه مقدار و ارتفاع سرباره پفکی را کاهش می‌دهد [۲، ۱۸، ۳۲–۳۴].

پس از کربن‌زدایی مذاب، معمولاً مرحله احیای سرباره با استفاده از سیلیسیم و آلومینیوم انجام می‌شود تا اکسیدهای کروم موجود در سرباره کاهش یابند. این احیا زمانی مؤثرتر است که سرباره و مذاب به‌شدت با یکدیگر مخلوط شوند؛ شرایطی که معمولاً هنگام تخلیه هم‌زمان فولاد و سرباره به پاتیل فراهم می‌شود [۹–۱۳، ۱۶].

۳. نتیجه‌گیری

نتیجه‌گیری‌های زیر مستقیماً از تحلیل ترمودینامیکی و مدل اکسایش ارائه‌شده در این پژوهش به دست آمده‌اند:

1. مرور منابع، اختلاف‌های قابل‌توجهی در مقادیر گزارش‌شده انرژی آزاد گیبس استاندارد (ΔG°) و پارامترهای برهم‌کنش نشان می‌دهد؛ اختلاف‌هایی که پیش‌بینی حلالیت تعادلی Cr–C را به‌شدت تغییر می‌دهند. با انتخاب مبنای میانی از پایگاه HSC 8.0 و پارامترهای سیگورث و همکاران [۲۲]، چارچوبی ترمودینامیکی برای مدل‌سازی فرایند فراهم شده است.

2. محاسبات ترمودینامیکی نشان می‌دهند که دما مؤثرترین متغیر برای کربن‌زدایی انتخابی است. افزایش دمای مذاب، کربن تعادلی را به‌شدت پایین می‌آورد و اکسایش کروم را محدود می‌کند. در حضور ۱۵ درصد وزنی Cr، افزایش دما از ۱۵۵۰ به ۱۸۰۰ درجه سلسیوس، کربن تعادلی را از ۱٫۲۱ به ۰٫۲۸ درصد وزنی می‌رساند. بر این اساس، کربن‌زدایی در EAF باید در دمایی بالاتر از ۱۶۵۰ درجه سلسیوس انجام شود.

3. مدل اکسایش، نقش محافظتی سیلیسیم را به‌ویژه در دماهای پایین تأیید می‌کند. در مذاب ۱۵۰۰ درجه سلسیوسی و با تزریق ۲۰ کیلوگرم اکسیژن به ازای هر تن فولاد، حضور ۰٫۵ درصد وزنی سیلیسیم مقدار کروم اکسیدشده را از ۷ به ۰٫۳ کیلوگرم بر تن کاهش داده است. سیلیسیم زودتر اکسید می‌شود، از کروم محافظت می‌کند و در مرحله بعد اجازه می‌دهد اکسایش کربن غالب باشد.

4. محاسبات تعادل همچنین نشان می‌دهند که کاهش فشار جزئی CO در مراحل بعدی، مانند VOD، ضروری است؛ زیرا با کاهش p_{CO}، حلالیت تعادلی کروم به‌شدت افزایش می‌یابد. از همین رو دامنه

اکسایش در کوره قوس الکتریکی باید محدود شود.

5. اگرچه حالت استاندارد یک درصد وزنی از نظر عملی ساده‌تر است، محاسبات مبتنی بر حالت هنری اصلاح‌شده، با در نظر گرفتن ضریب فعالیت حلال، در غلظت‌های بالاتر کربن مقدار اندکی بیشتر برای حلالیت تعادلی کروم به دست می‌دهند. این روش برای محلول‌های غیرفوق‌رقیق، مبنای نظری دقیق‌تری فراهم می‌کند.

6. برای به‌حداقل‌رساندن اتلاف کروم در مرحله ابتدایی و کم‌دمای EAF، باید دمش اکسیژن حین گرم‌شدن محدود شود و سیلیسیم کافی در دسترس باشد. در مقابل، هنگام کربن‌زدایی در دمای بالا، افت ناگهانی CO در گاز خروجی، که نشانه آغاز اکسایش شدید کروم است، باید مبنای توقف اکسیژن‌دمی قرار گیرد.

مشارکت نویسندگان

مشارکت نویسندگان: مفهوم‌پردازی، A.B. و J.B.؛ روش‌شناسی، A.B.؛ نرم‌افزار، A.B. و J.B.؛ اعتبارسنجی، J.B.؛ پژوهش، A.B. و J.B.؛ تأمین منابع، J.B.؛ سامان‌دهی داده‌ها، A.B. و J.B.؛ نگارش نسخه اولیه، A.B.؛ بازبینی و ویرایش، J.B.؛ تصویرسازی نتایج، A.B. و J.B.؛ سرپرستی، J.B. هر دو نویسنده نسخه منتشرشده را مطالعه و تأیید کرده‌اند.

تأمین مالی

این پژوهش از برنامه پژوهشی ARIS با شماره P2-0050 تأمین مالی شده است.

دسترسی به داده‌ها

در این پژوهش داده جدیدی ایجاد یا تحلیل نشده است؛ بنابراین اشتراک‌گذاری داده برای این مقاله موضوعیت ندارد.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام کرده‌اند که هیچ تعارض منافعی ندارند.

واژه‌نامه نمادها

نماد	معنی
G°	انرژی آزاد گیبس استاندارد
H°	آنتالپی استاندارد
S°	آنتروپی استاندارد
G	انرژی آزاد گیبس واکنش
Gdis	انرژی آزاد گیبس انحلال عناصر
Hdis	آنتالپی انحلال
Sdis	آنتروپی انحلال
T	دما
R	ثابت گازها
K	ثابت تعادل
pCO	فشار جزئی مونوکسیدکربن
ai	فعالیت عنصر i
%ai	فعالیت عنصر i در حالت استاندارد یک درصد وزنی
aiH	فعالیت عنصر i در حالت استاندارد هنری
fi	ضریب فعالیت عنصر i در حالت استاندارد یک درصد وزنی
i	ضریب فعالیت عنصر i در حالت استاندارد هنری
i°	ضریب فعالیت مرتبه صفر
sol	ضریب فعالیت حلال
wt.% i و wt.% j	درصد وزنی عناصر حل‌شده i و j
X	کسر مولی
Mj	جرم مولی عنصر j
M1	جرم مولی حلال

SteelExperts.ir

نماد	معنی
e	پارامتر خودبرهم‌کنش مرتبه اول در حالت یک درصد وزنی
e	پارامتر برهم‌کنش متقابل مرتبه اول در حالت یک درصد وزنی
	پارامتر برهم‌کنش در حالت هنری

منابع علمی مقاله

عنوان‌های کتاب‌شناختی، شماره ارجاع‌ها و پیوندهای DOI مطابق مقاله اصلی نگه داشته شده‌اند.

1. Wang, H. Investigations on the Oxidation of Iron-Chromium and Iron-Vanadium Molten Alloys. Ph.D. Thesis, Royal Institute of Technology—KTH, Stockholm, Sweden, 31 May 2010.
2. Heikkinen, E.-P.; Fabritius, T. Modelling of the Refining Processes in the Production of Ferrochrome and Stainless Steel. In Recent Researches in Metallurgical Engineering—From Extraction to Forming ; InTech: London, UK, 2012; pp. 65–88.
3. Kirschen, M.; Jung, I.H.; Hackl, G. Phase Equilibrium Diagram for Electric Arc Furnace Slag Optimization in High Alloyed Chromium Stainless Steelmaking. Metals 2020 , 10 , 826. DOI
4. Kho, T.S.; Swinbourne, D.R.; Blanpain, B.; Arnout, S.; Langberg, D. Understanding Stainless Steelmaking through Computational Thermodynamics Part 1: Electric Arc Furnace Melting. Trans. Inst. Min. Metall. Sect. C Miner. Process. Extr. Metall. 2010 , 119 , 1–8. DOI
5. Ghosh, A.; Chatterjee, A. Ironmaking and Steelmaking: Theory and Practice ; PHI Learning Private Limited: New Delhi, India, 2008; ISBN 9788120332898.
6. Arh, B.; Tehovnik, F. The Oxidation and Reduction of Chromium of Stainless Steels in an Electric Arc Furnace. Mater. Tehnol. 2007 , 41 , 203–211.
7. Swinbourne, D.R.; Kho, T.S.; Langberg, D.; Blanpain, B.; Arnout, S. Understanding Stainless Steelmaking through Computational Thermodynamics Part 2—VOD

Converting. Trans. Inst. Min. Metall. Sect. C Miner. Process. Extr. Metall. 2010 , 119 , 107–115. DOI

8. Swinbourne, D.R.; Kho, T.S.; Blanpain, B.; Arnout, S.; Langberg, D.E. Understanding Stainless Steelmaking through Computational Thermodynamics: Part 3—AOD Converting. Trans. Inst. Min. Metall. Sect. C Miner. Process. Extr. Metall. 2012 , 121 , 23–31. DOI

9. Sano, N. Reduction of Chromium Oxide in Stainless Steel Slags. In Proceedings of the 10th International Ferroalloys Congress, Cape Town, South Africa, 1–4 February 2004; pp. 670–677.

10. Guo, M.; Durinck, D.; Jones, P.T.; Heylen, G.; Hendrickx, R.; Baeten, R.; Blanpain, B.; Wollants, P. EAF Stainless Steel Refining—Part I: Observational Study on Chromium Recovery in an Eccentric Bottom Tapping Furnace and a Spout Tapping Furnace. Steel Res. Int. 2007 , 78 , 117–124. DOI

11. Burja, J.; Tehovnik, F.; Vode, F.; Arh, B. Microstructural Characterisation of Chromium Slags. Metalurgija 2015 , 54 , 379–382.

12. Björkvall, J.; Ångström, S.; Kallin, L. Reduction of Chromium Oxide Containing Slags Using CaC2. In Proceedings of the VII International Conference on Molten Slags Fluxes and Salts, Cape Town, South Africa, 25–28 January 2004; pp. 663–670.

13. Shibata, E.; Egawa, S.; Nakamura, T. Reduction Behavior of Chromium Oxide in Molten Slag Using Aluminum, Ferrosilicon and Graphite. ISIJ Int. 2002 , 42 , 609–613. DOI

14. Heikkinen, E.-P.; Ikäheimonen, T.; Mattila, O.; Fabritius, T. A Thermodynamic Study on the Oxidation of Silicon, Carbon and Chromium in the Ferrochrome Converter. In Proceedings of the 12th International Ferroalloys Congress: Sustainable Future, Helsinki, Finland, 6–9 June 2010; pp. 229–237.

15. Wang, H.; Nzott, M.M.; Teng, L.; Seetharaman, S. Decarburization of Ferrochrome and High Alloy Steels with Optimized Gas and Slag Phases towards Improved Cr Retention. J. Min. Metall. Sect. B Metall. 2013 , 49 , 175–181. DOI

16. Carboni, M.C.; Espinosa, D.C.R.; Tenório, J.A.S. Reduction of Chromium from Al 2 O 3 -CaO-SiO 2 -CrOx Slags by Carbon Dissolved in Liquid Iron. ISIJ Int. 2011 , 51 , 523–529. DOI

17. Ma, Z.; Janke, D. Thermodynamic Assessment to Chromium Oxidation in the Production of Stainless Steel. Steel Res. 2003 , 74 , 99–103. DOI

18. Pretorius, E.B.; Nunnington, R.C. Stainless Steel Slag Fundamentals—From Furnace to Tundish. Ironmak. Steelmak. 2002 , 29 , 133–139. DOI

19. Seetharaman, S. Treatise on Process Metallurgy, Volume 1: Process Fundamentals , 1st ed.; Seetharaman, S., McLean, A., Guthrie, R., Sridhar, S., Eds.; Elsevier: Oxford, .UK, 2013; ISBN 9780080969862

20. Barin, I. Therrnochernical Data of Pure Substances , 3rd ed.; Wiley: Weinheim, .Germany, 1995; ISBN 3527287450

21. Mihara, R.; Gao, X.; Kaneko, S.; Kim, S.; Ueda, S.; Shibata, H.; Seok, M.O.; Kitamura, S.y. Observation of Oxide Formation for Molten Fe-Cr-C Alloy at a High Carbon Region by Oxygen Top Blowing. Metall. Mater. Trans. B Process Metall. Mater. Process. Sci. 2016 , 47 , 1035–1051. DOI

22. Sigworth, G.K.; Elliott, J.F. The Thermodynamics of Liquid Dilute Iron Alloys. Metal Sci. 1974 , 8 , 298–310. DOI

23. Wagner, C. Thermodynamics of Alloys ; Addison-Wesley Press: Boston, MA, USA, .1962

24. Lupis, C.H.P. Generalized Interaction Coefficients. Ph.D. Thesis, Massachusetts .Institute of Technology, Cambridge, MA, USA, 1965

25. Steelmaking Data Sourcebook. The Japan Society for the Promotion of Science. In The 19th Committee on Steelmaking Steelmaking Data Sourcebook ; Gordon and .Breach Science Publisher: New York, NY, USA, 1988

26. Materia, T. Production of Stainless Steel: Part One. Available online: https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&NM=215 .((accessed on 21 November 2022

27. Lupis, C.H.P.; Elliott, J.F. Generalized Interaction Coefficients. Part I: Definitions. Acta. Metall. 1966 , 14 , 529–538. DOI

28. Bale, C.W.; Pelton, A.D. The Unified Interaction Parameter Formalism Thermodynamic Consistency and Applications. Metall. Trans. A 1990 , 21 , 1997–2002. DOI

29. Pelton, A.D.; Bale, C.W. A Modified Interaction Parameter Formalism for Non-Dilute Solutions. Metall. Trans. A 1986 , 17 , 1211–1215. DOI

30. Echterhof, T.; Risonarta, V.Y.; Beiler, C.; Lenz, S.; Jung, H.P.; Pfeifer, H. Decarburization Control during Stainless Steel Making in an EAF. In Proceedings of the SteelSim 2011, 4th International Conference on Modelling and Simulation of Metallurgical Processes in Steelmaking, Düsseldorf, Germany, 27th June 2011; pp. 1–8.

31. Bajželj, A.; Burja, J. Optimization of partial stainless steel melt oxidation in the EAF. In Proceedings of the METAL 2024, 33rd International Conference on Metallurgy and Materials, Brno, Czech Republic, 22–24 May 2024; pp. 19–24. DOI

32. Ito, K.; Fruehan, R.J. Slag Foaming in Electric Furnace Steelmaking. Trans. ISS Iron Steelmak. 1989 , 16 , 55–60.

33. Corbari, R.; Matsuura, H.; Halder, S.; Walker, M.; Fruehan, R.J. Foaming and the Rate of the Carbon-Iron Oxide Reaction in Slag. Metall. Mater. Trans. B Process Metall. Mater. Process. Sci. 2009 , 40 , 940–948. DOI

34. Vidacak, B.; Arvanitidis, I.; Jönsson, P.G.; Sjöberg, P. Observation on Foaming of EAF Slags in the Production of Stainless Steel. Scand. J. Metall. 2002 , 31 , 321–327. DOI

یادداشت ناشر

یادداشت ناشر: دیدگاه‌ها، نظرات و داده‌های مندرج در مطالب منتشرشده، متعلق به نویسندگان و مشارکت‌کنندگان است و لزوماً موضع MDPI یا سردبیران آن نیست. ناشر و سردبیران درباره خسارت‌های

احتمالی ناشی از به‌کارگیری ایده‌ها، روش‌ها، دستورالعمل‌ها یا محصولات ذکرشده مسئولیتی نمی‌پذیرند.

ترجمه فارسی و تنظیم برای مرکز دانش شبکه خبرگان صنعت فولاد ایران از اثر: Bajželj, A.; Burja, J. *Thermodynamic Guidelines for Minimizing Chromium Losses in Electric Arc Furnace Steelmaking.* Metals 2025, 15, 1129. https://doi.org/10.3390/met15101129. استفاده بر پایه CC BY 4.0 با اعلام تغییر زبان و قالب. تصاویر اقتباسیِ دارای حقوق نامشخص بازنشر نشده‌اند.

نسخه آنلاین مقاله: https://landing.steelexperts.ir/2026/10/27/sx-r012-chromium-loss-eaf-thermodynamics/

SteelExperts.ir