

چگونگی ذوب آهن اسفنجی در کوره های فولادسازی

خطیب الاسلام صدرنژاد

خلاصه

درک دقیق رفتار کلوخه های آهن اسفنجی هنگام ذوب در کوره های فولاد سازی جهت اصلاح طرح این کوره ها و همچنین اصلاح مشخصه های فیزیکی و شیمیایی کلوخه های مزبور لازم می باشد. در این مقاله وقایع مربوط به ذوب پیوسته کلوخه های آهن اسفنجی در کوره های فولاد سازی، تجزیه و تحلیل گردیده است. هدف بحث ارائه روشی است جهت بررسی کمی پدیده های پیچیده که به دلیل کاربرد صنعتی اهمیت می یابند. نحوه ترکیب اطلاعات تجربی و یافته های آزمایشگاهی به منظور ساختن الگویی که بتواند میزان اثر عوامل موثر بر ذوب کلوخه های آهن اسفنجی در کوره های فولاد سازی را پیش بینی نماید، به عنوان کاربرد آموزنده روش فوق مطرح گردید است. نتیجه عملی این بررسی بهبود و توسعه تکنولوژی ذوب و تهیه فلزات می باشد.

مقدمه

این قطعات به دست می آید، در مقالاتی که قبلاً " به چاپ رسیده، آمده است. ۴- جهت تعمیم روش مزبور برای ذوب آهن اسفنجی در سایر کوره های فولاد سازی می توان شرایط حاکم بر محیط ذوب در این کوره ها را شناسایی کرده، و بجای اطلاعات مربوط به کوره های قوس الکتریکی بکار برد. به منظور طراحی و ساختن الگوی فوق، آزمایشات متعددی برای شناسایی فرایندهای انتقال حرارت، احیای نهایی، انجماد سرباره مذاب و ذوب قطعه جامد غوطه ور در سرباره، و برای یافتن تغییر خواص فیزیکی و شیمیایی مواد حین انجام عملیات گرم شدن و ذوب، انجام شده که نتایج آنها در ساختن الگوی فوق به کار گرفته شده است. ۵-۷

تعیین نقش برخی از پارامترهای موثر در افزایش بهره دهی تولید در کوره های فولاد سازی و محاسبه میزان اثر آنها به کمک مدل فوق قبلاً" تعیین و تشریح گردیده است. ۷ از جمله پارامترهای فوق می توان مشخصات فیزیکی و شیمیایی قطعات جامد، ظرفیت و ابعاد کوره، روش بار کردن و مقدار مواد بار شده و محل های ورود بار و نحوه توزیع بار در فازهای مایع موجود در کوره را نام برد.

در این مقاله چگونگی عملکرد کلوخه های آهن اسفنجی از هنگام ورودشان به داخل کوره تا ذوب شدن کاملشان مورد بحث و بررسی قرار گرفته، ضمن تشریح حوادثی که منجر به ذوب کامل این قطعات می گردد، نتایج تحقیقات انجام یافته جهت تحلیل این حوادث و کشف علل آنها به اختصار بیان شده اند. بخش عمده مقاله به تجزیه و تحلیل نحوه گرم

آهن اسفنجی را، که از احیای مستقیم سنگ معدن به دست می آید، می توان در بسیاری از کوره های تهیه آهن و فولاد بار نمود. استفاده از کلوخه های پر کربن آهن اسفنجی به عنوان جزئی از بار کوره بلند، سبب کاهش مصرف کوک و بهبود عملکرد کوره می گردد. اما این عمل، جز در مواردی که استفاده از بار معمولی سبب کاهش بهره دهی کوره گردد، مقرون به صرفه نیست. استفاده از آهن اسفنجی در مبدل های فولاد سازی نیز، تنها در شرایطی که تنظیم ترکیب شیمیایی و درجه حرارت کوره به کمک آن تسهیل گردد، توجیه پذیر است. میزان درصد آهن اسفنجی که سبب ایجاد حداکثر بهره دهی در کار کوره بلند (یا مبدل های تهیه فولاد) همراه با حداقل هزینه تولید گردد، بستگی به قیمت تمام شده آهن اسفنجی و قیمت تمام شده کوک داشته، در شرایطی که احیای سنگ معدن توسط گاز طبیعی صورت پذیرد، تابعی از قیمت های گاز طبیعی و کوک می باشد. عمده ترین مورد مصرف آهن اسفنجی در تهیه فولاد، از طریق ذوب در کوره های قوس الکتریکی است، که در آنها آهن اسفنجی می تواند جایگزین قراضه شود. مزیت استفاده از آهن اسفنجی در روش اخیر، امکان بار کردن مداوم قطعات آن در کوره می باشد که سبب افزایش بهره دهی تولید خواهد شد. برخی از مزایای ذوب آهن اسفنجی در کوره های قوس الکتریکی در مقاله دیگری (ماخذ ۱) قبلاً ذکر شده اند. روش بررسی کمی رفتار قطعات کروی آهن اسفنجی در کوره های قوس الکتریکی به کمک الگویی ریاضی که از حل معادلات انتقال حرارت همراه با شرایط حاکم بر محیط ذوب

از دیدگاه تئوری هرگز به طور کامل ذوب نشده، اندازه آن تنها در زمان بینهایت به سمت صفر میل خواهد نمود. به همین جهت نمی توان زمان دقیق ذوب کلوخه های جامد بار شده در کوره را به کمک الگوهای ریاضی، براساس کوچک شدن مستمر قطعه در شکل کروی آن محاسبه نمود. ولی می توان زمان لازم جهت ذوب قسمت عمده حجم هر قطعه (مثلاً ۹۰٪ حجم آن) را به عنوان زمان ذوب قطعه در نظر گرفته و به سهولت محاسبه کرد.

تحولاتی که حین گرم شدن و ذوب قطعات تکی آهن اسفنجی رخ می دهند، ذیلاً "به صورت جداگانه تشریح می گردند.

محیط ذوب شدن قطعات از آنجا که وزن مخصوص کلوخه های آهن اسفنجی عموماً "کمتر از وزن مخصوص فلز مذاب می باشد، قطعات جامد این مواد قبل از ذوب شدن کامل، امکان ورود به فلز مذاب را نخواهند یافت. این قطعات در صورتی که وزن مخصوصشان از وزن مخصوص سرباره بیشتر باشد، به طرف فصل مشترک سرباره و فلز سقوط کرده و در آنجا تا ذوب شدن کامل به دام خواهند افتاد، اما در صورتی که وزن مخصوصشان، همانگونه که در غالب موارد اتفاق می افتد، با وزن مخصوص سرباره اختلاف قابل توجهی نداشته باشد، پس از سقوط در حمام مذاب، در صورتی که شتاب اولیه لازم جهت رسیدن به فصل مشترک فلز و سرباره نداشته باشند، در سرباره مایع غوطه ور در همانجا ذوب خواهند شد. نمایش تصویری موارد فوق در شکل ۱ آمده است.

از آنجا که ضریب هدایت حرارت فلز مذاب به مراتب بیشتر از ضریب انتقال حرارت سرباره می باشد، مقدار زیادی از حرارت لازم جهت ذوب قطعات به دام افتاده در فصل مشترک فلز و سرباره از فلز مذاب تأمین شده، سرعت ذوب قطعات به دام افتاده به مراتب بیشتر از سرعت ذوب قطعات غوطه ور در سرباره خواهد بود. در کوره های قوسی، که مقدار زیادی از حرارت حاصل از قوس الکتریکی به سرباره مذاب انتقال می یابد، سقوط قطعات فشرده آهن اسفنجی با وزن مخصوصی به مراتب بیشتر از وزن مخصوص سرباره به فصل مشترک فلز مذاب و سرباره، سبب سرد شدن فلز مذاب و نتیجتاً "کم شدن باز دهی ذوب خواهد شد. در این نوع کوره ها، سرباره مایع مناسبترین محیط جهت ذوب قطعات جامد بار شده داخل کوره بوده، استفاده از قطعات آهن اسفنجی ذوب شونده در سرباره، سبب افزایش بهره دهی حرارتی کوره و کم شدن میزان تابش به سقف و دیوارها و نتیجتاً "کاهش میزان تخریب و

شدن و ذوب قطعات تکی آهن اسفنجی اختصاص یافته، اثر سایر قطعات موجود در حمام مذاب بر عملیات ذوب در بخش جداگانه ای تشریح و در پایان طرز تلفیق اطلاعات به دست آمده جهت ساختن الگوی ریاضی مطلوب به اختصار توصیف گردیده است.

کلوخه های تکی آهن اسفنجی در کوره های فولاد سازی

هر قطعه آهن اسفنجی، پس از بار شدن در کوره فولاد سازی، به محیط سرباره مذاب، که به علت کم بودن وزن مخصوص روی فلز مذاب قرار دارد، وارد می شود. این قطعه، به محض ورود در سرباره توسط قشر منجمد شده ای از سرباره احاطه شده، دمای سطح آن افزایش می یابد. انتقال حرارت سطح به داخل قطعه، سبب افزایش دمای داخلی و انجام فعل و انفعالات احیای نهایی و تشکیل گازهای منواکسید و دی اکسید کربن گردیده، خروج این گازها از داخل قطعه و حرکتشان به طرف سطح فوقانی حمام مذاب سبب بهم خوردن مذاب و افزایش سرعت انتقال حرارت به سطح خارجی قطعه جامد می گردد.

ادامه فعل و انفعالات احیای نهایی به کاهش اکسیژن و کربن موجود در قطعه و تغییر خواصی نظیر وزن مخصوص، تخلخل، حرارت ویژه، ضریب انتقال حرارت، حرارت نهان ذوب و نقطه شروع و خاتمه ذوب قطعه می انجامد. جذب حرارت توسط واکنشهای گرماگیر، سبب کند شدن سرعت افزایش دما در قطعه و افزایش غیر یکنواختی درجه حرارت در داخل آن می شود. دیری نمی پاید که درجه حرارت سطح قطعه شارژ شده، به حدی می رسد که سرعت انتقال حرارت از سطح به طرف داخل قطعه کمتر از سرعت انتقال حرارت از حمام مذاب به سطح قطعه جامد گشته، قشر منجمد شده در سطح قطعه شروع به ذوب شدن می نماید. ذوب این قشر با خروج گازهای حاصل از احیای نهایی آهن اسفنجی، هم به جهت افزایش سرعت انتقال حرارت از حمام مذاب به قطعه جامد به علت بهم خوردن حمام مذاب، و هم با پس زدن لایه سرد موجود در سطح سرباره جامد، تشدید خواهد شد.

با اتمام مرحله ذوب قشر منجمد شده، انتقال حرارت به داخل قطعه جامد با سرعت بیشتری انجام گرفته، درجه حرارت سطح قطعه به درجه حرارت ذوب آهن اسفنجی نزدیک می شود. در اثر انجام عمل ذوب، قطعه جامد مرتباً "کوچکتر شده میزان حرارت منتقل شده به سطح آن، که متناسب با مساحت سطح قطعه می باشد، نیز کاهش می یابد. اگر قطعه جامد به صورت کروی باقی بماند و قشر ذوب شده آن مرتباً "از سطح قطعه کنار برود، قطعه جامد

اگر سرباره از نظر شرایط انتقال حرارت در حالت رکود قرار داشته و هدایت حرارت در آن بسختی صورت پذیرد، سرعت ورود حرارت به سطح قشر منجمد شده تأییدی کم تر از سرعت خروج حرارت از آن بوده، مرتباً "برضخامت قشر منجمد شده اضافه خواهد شد". برعکس، اگر سرباره بشدت متلاطم و از نظر شرایط انتقال حرارت فعال باشد، سرعت ورود حرارت به سطح خارجی قشر منجمد شده بیشتر از حالت اول بوده، افزایش ضخامت قشر منجمد به کندی صورت گرفته، قشر مزبور به زودی شروع به ذوب شدن خواهد نمود (شکل ۳). در شرایط آزمایشی مربوط به شکل ۳، سرباره مذاب توسط گازهای خنثی که با سرعت های گوناگون از سوراخ های تعبیه شده در قطعه غوطه ور خارج می شده، بهم خورده است. قطعات غوطه ور از جنس نیکل و به صورت کره (مانند شکل ۴) از طریق ریخته گری دقیق تولید شده و سپس در آنها سوراخ هایی تعبیه گردیده است. گازهای خنثی به کمک یک لوله فولادی کسه وظیفه غوطه ور نگهداشتن قطعه را نیز عهده دارد از سوراخ های تعبیه شده در قطعه خارج و مذاب را بهم زده است. اثر فعالیت حاصل از این نوع بهم خوردن مذاب بر ضخامت قشر منجمد شده بر روی قطعه، اندازه گیری شده است. شرح کامل روش آزمایش و نتایج حاصله در مآخذ آمده است.

بهم خوردن سرباره مذاب نه تنها بر ضریب انتقال حرارت آن اثر افزایش می گذارد، بلکه با شکستن قسمتهایی از ساختمان ستونی منجمد شده در جبهه انجماد، درجه حرارت جبهه انجماد را تغییر داده بر سرعت انتقال حرارت به داخل قطعه منجمد با هم می افزاید. شکستن قطعات جامد سرباره، در اثر تلاطم فاز مذاب، غالباً "در حین ذوب سرباره منجمد شده و عقب نشینی جبهه انجماد اتفاق می افتد. عقب نشینی جبهه انجماد وقتی صورت می گیرد که دمای سطح قطعه آهن اسفنجی به حدی برسد که سرعت ورود حرارت به جبهه انجماد بیشتر از سرعت انتقال حرارت از جبهه به طرف سطح گردد.

جدا شدن قطعات جامد سرباره ممکن است همچنین به طور مکانیکی توسط گازهای خارج شونده از سطح قطعه، مطابق الگوی فیزیکی نشان داده شده در شکل ۴، صورت گیرد. خروج گاز به صورت اخیر، نه تنها سبب تلاطم و بهم خوردن سرباره مذاب در اطراف قطعه می شود، بلکه باعث کاهش ضخامت قشر جامد سرباره در اطراف محلهای خروج گاز نیز می گردد. با اندازه گیری ضخامت قشر سرباره منجمد شده روی قطعات غوطه ور در سرباره مذاب، کم شدن ضخامت این

خوردگی آنها خواهد گردید. برعکس در مبدل های فولادسازی که حرارت حاصل از سوختن ناخالصی های موجود در فلز مذاب سبب افزایش درجه حرارت فلز مذاب و ایجاد نیاز به مسواک خنک کننده می شود، استفاده از قطعات فشرده آهن اسفنجی که می توانند خود را بر احتی به فصل مشترک سرباره و فلز بوسانند، مناسبتر به نظر می رسد.

نقش وزن مخصوص قطعات جامد بار شونده در کنترل عملیات ذوب در کوره های فولادسازی از بحث فوق آشکار می شود. نیروی ماند (اینرسی) قطعات بار شده نیز می تواند به عنوان عامل مؤثری جهت کنترل این عملیات به کار گرفته شود. در این خصوص انجام اندک تغییراتی در طراحی کوره های فولادسازی که قطعات آهن اسفنجی به طور مداوم در آنها بار می شوند، می تواند منجر به افزایش سرعت قطعات شارژ شده در هنگام برخورد با سطح مذاب گشته سقوط سریع آنها را به فصل مشترک سرباره و مذاب سبب گردد.

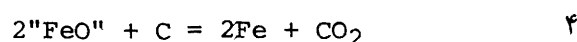
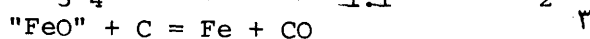
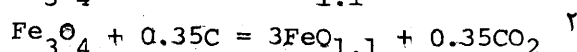
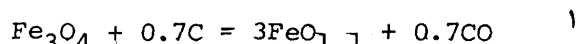
انجماد و ذوب شدن سرباره هر قطعه آهن اسفنجی در بدو ورود به داخل سرباره مذاب، دمائی بمراتب کم تر از دمای سرباره دارد. نتیجه چنین اختلاف دمایی، انتقال بسیار سریع حرارت از سرباره به داخل قطعه و بالطبع سرد شدن و انجماد قشر نازکی از سرباره مذاب مجاور قطعه است. سرباره های فولاد سازی غالباً "دارای یک فاصله انجماد نسبتاً بزرگ بوده، در یک درجه حرارت ثابت تغییر حالت نمی دهند. سرعت پیشرفت جبهه انجماد، و ساختمان میکروسکوپی سرباره منجمد شده، تابع عوامل از قبیل موارد زیر می باشند:

- مشخصات حرارتی و شیمیایی سرباره مذاب و قطعه غوطه ور در آن
- شرایط حاکم بر محیط کوره مانند نحوه و میزان تلاطم سرباره مذاب
- مکانیسم و سرعت خروج گازهای حاصل از احیای نهایی قطعه
- چگونگی توزیع قطعات آهن اسفنجی بار شده و حبابهای صعود کننده گاز در کوره.

اندازه گیری میزان تاثیر این عوامل نیاز به آزمایشات نسبتاً دقیقی دارد که انجام آنها در شرایطی مشابه شرایط کوره های فولاد سازی بسختی امکان پذیر می باشد. در شرایطی که توزیع درجه حرارت در جبهه انجماد مطابق الگوی تصویری نمایش داده شده در شکل ۲ باشد و انتقال حرارت در منطقه همبری به طریق هدایت Conduction صورت پذیرد، جهت محاسبه سرعت انتقال حرارت، درجه حرارت جبهه انجماد ممکن است برابر درجه حرارت حد بالایی انجماد فرض گردد.

گاز منواکسید و یادی اکسید کربن از کلوخه خارج می‌گردند. با توجه به تعداد فازهایی که ممکن است حامل اکسیژن و کربن باشند، احیای نهایی آهن اسفنجی می‌تواند مطابق واکنشهای متنوعی بیان گردد. آزمایشهای انجام شده بر روی نمونه‌های گوناگون، که در آنها اکسیژن بیشتر به صورت مگنتیت و کربن بیشتر به صورت سمنتیت است، نشان می‌دهند که منحنی خروج گاز از آنها، وقتی که با سرعتی معادل ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد در دقیقه یا کمتر گرم شوند، مشابه منحنی نمایش داده شده در شکل ۷ می‌باشد. این منحنی‌ها دارای دونقطه اوج در دماهای حدود ۷۵۰ و ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشند. در سرعتهای نسبتاً زیاد افزایش دما، ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد در دقیقه و بیشتر، تغییراتی در محل نقاط اوج و شکل منحنی بین آنها به وجود می‌آید که ظاهراً "برای نایک‌خواختی‌های حاصل در درجه حرارت نمونه، به سبب سرعت بسیار زیاد افزایش دما می‌باشد.

از نتایج بررسیهای آزمایشگاهی چنین بر می‌آید که نقطه اوج اول، به سبب وجود شرایط مناسب جهت احیای مگنتیت به وستیت در دمائی برابر ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد، مطابق و واکنشهای ۱ و ۲ پدید می‌آید. در صورتی که نقطه اوج دوم، بر اثر وجود شرایط مناسب جهت احیای وستیت به آهن در دمای حدود ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد، مطابق واکنشهای ۳ و ۴ بوجود می‌آید.



شکل منحنی‌های خروج گاز از آهن اسفنجی رامی‌توان بادر نظر گرفتن شرایط گرمایی (ترمودینامیکی) و شرایط جنبشی (سینتیکی) لازم جهت پیشرفت واکنشهای فوق، بسادگی توجیه کرد. مقایسه مقادیر گاز تولید شده با مقادیر استوکیومتری مربوط به واکنشهای مزبور، ارتباط نقاط اوج اول و دوم شکل ۷ را با احیای مگنتیت به وستیت و وستیت به آهن تأیید نموده است. ۶ کل حجم گازهای خارج شده از آهن اسفنجی رامی‌توان با محاسبه سطح زیر منحنی شکل ۷ به دست آورد (شکل ۸).

تغییر خواص مواد انجام واکنشهای احیای نهایی و خروج گاز از قطعات آهن اسفنجی سبب ایجاد تغییرات عمده‌ای در خواص این قطعات و خواص مواد مذاب اطراف آنها می‌گردد. یکی از این

قشر در اطراف محلهای خروج گاز و همچنین کاهش متوسط ضخامت قشر آشکار شده است. ۴ از این مطلب می‌توان نتیجه گرفت که گازهای خارج شونده از قطعه، جزایر جامد سرباره را که در اطراف قطعه غوطه‌ور تشکیل گردیده‌اند به داخل فضا مذب‌انداخته، سبب تقلیل ضخامت قشر منجمد شده در اطراف سوراخهای خروج گاز، می‌گردند. همچنین ممکن است مطابق الگوی نشان داده شده در شکل ۵، حبابهای گاز در حین ترک سطح قطعه، قسمتهای انتهایی ستونهای منجمد شده را همراه با بخشهایی از لایه مرز حرارتی thermal boundary layer موجود در سطح قطعه، با خود به داخل فاز مذاب منتقل نموده، سبب افزایش ضریب انتقال حرارت و کم شدن ضخامت منطقه خمیری انجماد شوند.

نتایج بررسیهای اولیه در آزمایشگاه نشان داده‌است که سوراخهای خروج گاز، که بر سطح پوسته جامد ایجاد شده، غالباً محدود بوده و تعدادشان با افزایش در صد اولیه اکسیژن و کربن موجود در آهن اسفنجی اضافه می‌شود. شکل ۶ سه نوع کلوخه آهن اسفنجی را، که پس از غوطه‌ور شدن در سرباره مذاب و انجماد سرباره بر سطحشان از داخل سرباره مذاب به سرعت بیرون کشیده و سرد شده‌اند، نشان می‌دهند. ترکیب شیمیایی این کلوخه‌ها طوری بوده‌است که میزان گازهای خارج شده از داخل آنها بترتیب از الف به ج افزوده گردد. مطابق شکل ۶، خروج حجم زیاد گاز از کلوخه ج سبب خرد شدن و جدا شدن قسمت اعظم سرباره منجمد شده بر سطح قطعه، گردیده‌است. لازم به تذکر است که خرد شدن قسمتی از قشر نازک سرباره پس از بیرون کشیدن کلوخه از داخل سرباره مذاب به علت ادامه خروج گاز و همچنین به علت تغییرات حجمی سرباره و کلوخه صورت گرفته است.

پس از اتمام ذوب قشر منجمد شده، سطح آهن اسفنجی مستقیماً در تماس با سرباره مذاب قرار خواهد گرفت. تماس سطح قطعه با سرباره مذاب سبب افزایش ناگهانی سرعت انتقال حرارت به داخل قطعه شده، به گرم شدن سریع آن منجر خواهد شد. کاهش اندازه قطعه در اثر ذوب شدن آن سرانجام با رسیدن دمای سطح قطعه به نقطه ذوب آهن اسفنجی آغاز خواهد گردید.

احیای نهایی و تشکیل گاز در آهن اسفنجی، اکسیژن ممکن است به صورت وستیت و یا مگنتیت موجود باشد. کربن نیز ممکن است به هریک از صورتهای سمنتیت، حل شده در فاز آهن، و یا گرافیت آزاد وجود داشته باشد. با گرم شدن کلوخه آهن اسفنجی، اکسیژن و کربن با یکدیگر ترکیب شده و به صورت

مخلوط وضرایب انتقال حرارت سرباره^۶ مذاب و حبابهای گاز دارد. گازهای متصاعد شده چه با سرباره^۶ مذاب مخلوط تک فازی تشکیل دهند و چه به صورت فازی جداگانه در سرباره^۶ مذاب شناور شوند، سیالیت سرباره^۶ مذاب را کاهش داده، زمان ذوب شدن قطعات آهن اسفنجی غوطه‌ور در فاز مذاب را می‌افزایند.

ذوب مجموعه‌های قطعات آهن اسفنجی

آنچه تاکنون شرح داده شد مربوط به رفتار قطعات تکی آهن اسفنجی غوطه‌ور در فاز مذاب بود. اگر تعداد قطعاتی که در فاز مذاب غوطه‌ورند در یک زمان به میزانی افزایش یابد، که فاصله^۶ بین آنها از حد معینی کمتر شود، این قطعات از نظر حرارتی بر روی هم اثر گذاشته، رفتارشان دیگر مانند رفتار قطعات مجزی از هم نخواهد بود. سرباره^۶ موجود بین این قطعات در این حالت سرد شده، همراه با آنها تشکیل جزایر غوطه‌ور و دیر گدازی را خواهد داد. نسبت سطح به^۶ حجم این جزایر به مراتب کمتر از نسبت سطح به^۶ حجم قطعات تکی بوده، ورود حرارت به آنها بکندی صورت گرفته و بسیار دیر ذوب خواهند شد. وجود مقدار بیش از حد آهن اسفنجی در فاز مذاب همچنین سبب کم شدن سیالیت فاز مذاب و کاهش عدد $Nusselt$ آن می‌گردد که خود اثر معکوس بر سرعت ذوب مواد و بهره‌دهی عملیات کوره دارد.

برای آنکه مجموعه‌های قطعات آهن اسفنجی به صورت جزایر گداز در نیایند، لازم است طرز بار کردن مواد در کوره طوری باشد که قطعات آهن اسفنجی به صورت یکنواخت توزیع شده به صد کافی از یکدیگر فاصله داشته باشند به نحوی که از نظر حرارتی تحت تأثیر یکدیگر قرار نگیرند. با استفاده از روابط تجربی انتقال حرارت، بسادگی می‌توان حداقل فاصله^۶ مجاز بین قطعات آهن اسفنجی و از آنجا بهترین حالت عملیات بار کردن را در کوره‌های فولاد سازی معین نمود. به نظر می‌رسد که این فاصله معادل چندین برابر ضخامت لایه^۶ مرز حرارتی قطعات باشد.

باتوجه به ابعاد کوره‌های فولاد سازی، در صورتی که بار کردن مداوم قطعات آهن اسفنجی توأم با توزیع یکنواخت آنها در فاز مذاب صورت گیرد، افزایش سرعت تغذیه^۶ مواد در کوره، تا حد بسیار بالا و بدون ایجاد جزایر دیر گداز امکان پذیر می‌باشد. خروج حجم نسبتاً زیاد گازهای حاصل از احیای نهایی آهن اسفنجی در این گونه موارد، سبب بهم خوردن فاز مذاب و توزیع بهتر قطعات بار شده و نتیجتاً بهبود عملیات ذوب می‌گردد.

تغییرات، تغییر نقاط شروع و خاتمه انجماد آهن اسفنجی است که ذیلاً^۶ تشریح می‌گردد. در شکل‌های ۱ و ۹ تغییرات درصد اکسیژن و کربن سه نوع آهن اسفنجی بر دیاگرامهای تعادلی آهن - اکسیژن و آهن - کربن منطبق شده‌اند. با مراجعه به این دیاگرامها می‌توان به اثر احیای نهایی بر نقاط شروع و خاتمه^۶ ذوب آهن اسفنجی پی برد. منحنی‌های شکل‌های ۱ و ۹ نشان می‌دهند که آهنهای اسفنجی نیز مانند سرباره‌های فولاد سازی، غالباً^۶ دارای فواصل ذوب نسبتاً^۶ بزرگی هستند. با این تفاوت که فاصله^۶ انجماد سرباره‌ها در حین گرم شدن و ذوب آهن اسفنجی تا حد زیادی بلا تغییر باقی می‌ماند، در حالی که بخاطر تغییرات ترکیب شیمیایی، فاصله^۶ ذوب آهنهای اسفنجی دستخوش تغییرات وسیعی می‌باشد.

علاوه بر تغییر ترکیب شیمیایی، زینتر شدن قطعات متخلخل آهن اسفنجی در درجه^۶ حرارت‌های بالا که خود سبب تغییر اندازه، وزن مخصوص، قابلیت نفوذ گاز، ضریب هدایت گرما و برخی دیگر از خواص فیزیکی و حرارتی آنها می‌گردد، نیز می‌تواند بر فاصله^۶ ذوب شدن این قطعات اثر بگذارد. تغییر ترکیب شیمیایی قطعات آهن اسفنجی، همچنین بر ضریب هدایت حرارت آنها که تابعی از نوع و درصد مواد تشکیل دهنده، میزان تخلخل و وزن مخصوص قطعات، طرز توزیع و شکل حفره‌های خالی موجود در آنها، نوع و میزان ناخالصی‌های آنها می‌باشد، اثر می‌گذارد.

تغییرات خواص شیمیایی و حرارتی، در داخل قطعات آهن اسفنجی غوطه‌ور در سرباره مذاب، یکنواخت نبوده و تابعی از طرز توزیع درجه حرارت در این قطعات می‌باشد. در شکل ۱۱ توزیع درجه حرارت و ترکیب شیمیایی در داخل یک قطعه^۶ کروی آهن اسفنجی به طور تصویری نشان داده شده است. اختلاف درجه^۶ حرارت سطح قطعه با مرکز آن بستگی به قابلیت هدایت حرارت قطعه داشته، هر اندازه قطعه‌های تری باشد این اختلاف کمتر بوده، قطعه زودتر گرم، احیا و ذوب خواهد شد.

خروج گاز از قطعات غوطه‌ور آهن اسفنجی، خواص حرارتی سرباره^۶ مذاب را نیز تغییر می‌دهد. حبابهای گاز، که به طرف سطح فوقانی سرباره مذاب صعود می‌کنند، بر ضریب انتقال حرارت، ضریب هدایت حرارت، سیالیت و وزن مخصوص سرباره اثرات قابل ملاحظه‌ای می‌گذرانند. حرکت گازها در فاز مذاب سبب ایجاد تلاطم و نتیجتاً^۶ افزایش ضریب انتقال حرارت یا عدد $Nusselt$ فلز مذاب می‌گردد. ضریب هدایت حرارت فاز مذاب بستگی به میزان گازهای

Symp. on Copper Extraction and Refining, TMS-AIME, Las Vegas, Nev., Feb. 1976.

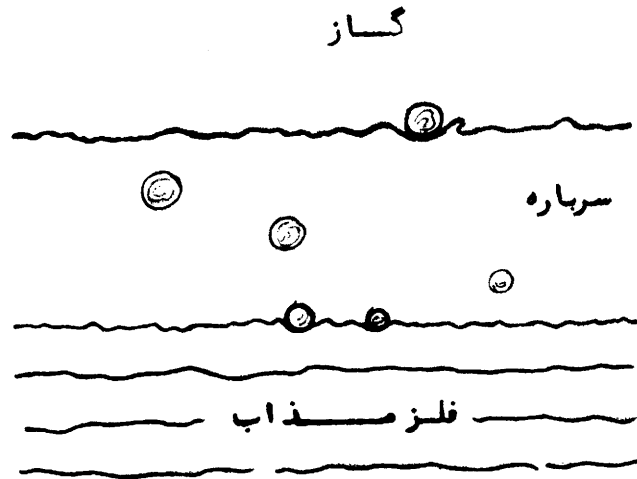
4. Elliott, Mauman and Sadrnezhaad: *Proc. Int. Iron and Steel Cong.*, TMS-AIME, Chicago, Illinois, PP. 397-404, April 1978.
5. Sadrnezhaad: Ph.D. Thesis, Mass. Inst. Tech.
6. Sadrnezhaad and Elliott: *Iron and Steel International*, December 1980, PP. 327-339.
7. Sadrnezhaad: *Iron and Steel International*, 1981, PP. 309-314.
8. Elliott, Gleiser and Ramakrishna: *Thermochemistry for Steelmaking*, Vol II, Addison-Wesley, Mass. 1963.

جمع بندی اثرات عوامل مؤثر در ذوب قطعات

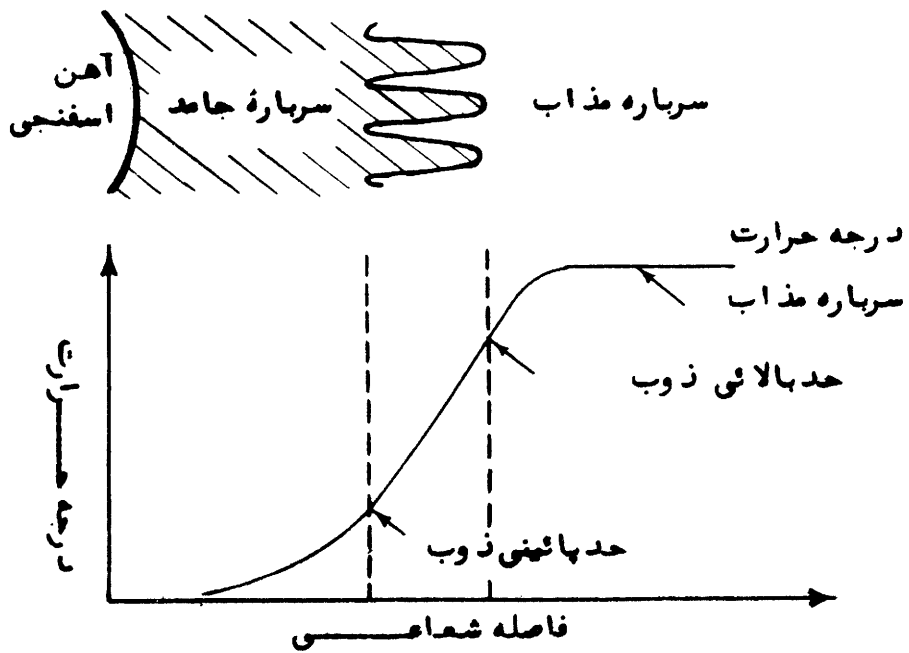
اثرات کلیه عوامل مؤثر در ذوب قطعات بارشدن آهن اسفنجی را تنها می توان در یک الگوی ریاضی جامع قابل حل به وسیله کامپیوتر جمع نمود، با حل معادله انتقال حرارت فوریه در مختصات کروی، توزیع درجه حرارت در یک کلوخه کروی غوطه ور و موقعیت فصل مشترک جامد و مایع در هر لحظه پس از غوطه ور شدن این کلوخه به دست می آید. برای حل این معادله، لازم است شرایط حدی معادله مزبور را به دقت مشخص نمود. برای مشخص کردن این شرایط می توان میزان گازهای خارج شده از قطعات غوطه ور را به کمک آزمایشات ساده معین نموده، به کمک این مقادیر، خواص مواد جامد و مواد مذاب و تغییرات آنها و همچنین عدد Nusselt فاز مذاب را با استفاده از روابط تجربی موجود بر حسب درجه حرارت محاسبه و در الگوی ریاضی فوق قرارداد. γ - از آنجا که شرایط و خواص حرارتی فاز مذاب اطراف کلوخه و نیز خواص شیمیایی، فیزیکی، و حرارتی خود کلوخه توابعی از درجه حرارت کلوخه و زمان پس از غوطه وری آن می باشند، لذا لازم است کلیه روابط و معادلات فوق به روش عددی مرحله به مرحله و تا ما "حل شوند. الگوی جامع به دست آمده از حل معادلات فوق، می تواند جهت پیش بینی عملکرد کلوخه های گوناگون آهن اسفنجی در کوره های فولاد سازی مورد استفاده قرار گرفته، برای محاسبه اثر عوامل مختلف مانند ترکیب شیمیایی، اندازه، و وزن مخصوص قطعات بار و همچنین شکل و ابعاد کوره های تولید فولاد بر سرعت ذوب کلوخه ها و بهره دهی تولید در این کوره ها به کار گرفته شود. شناسایی موثرترین مشخصه های آهن اسفنجی و کوره های ذوب و پیش بینی میزان اثر این مشخصه ها بر سرعت ذوب کلوخه های آهن اسفنجی از عمده ترین موارد استفاده چنین الگویی خواهند بود.

مآخذ

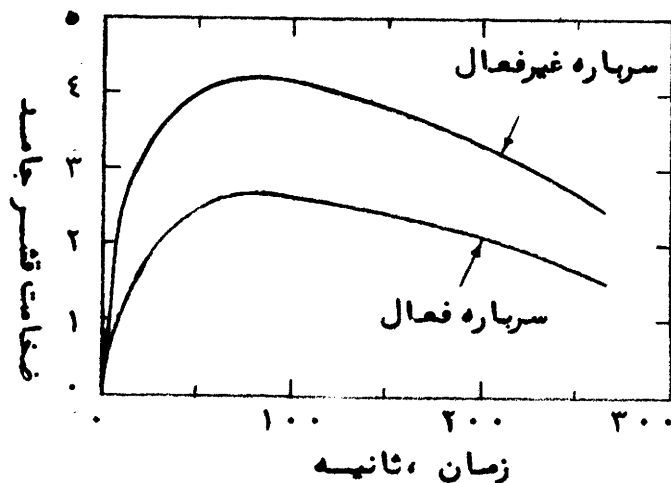
- ۱- صدرنژاد: سمینار ذوب آهن ۱۳۵۹ (نقد و بررسی روشهای احیای مستقیم برای تولید آهن و فولاد در ایران).
2. Elliott and Nauman: *Proc. Int. Symp. on Slags, Metals and Gases*, Electrochem. Soc., Toronto, Canada, PP. 238-250, May 1975.
3. Numan, Foo and Elliott: *Proc., Int.*



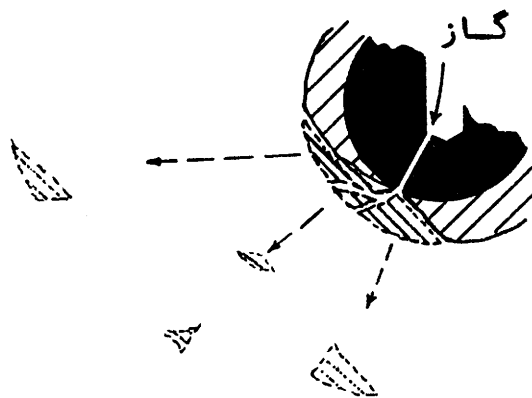
شکل ۱ - کلوخه های آهن اسفنجی در کوره فولاد سازی



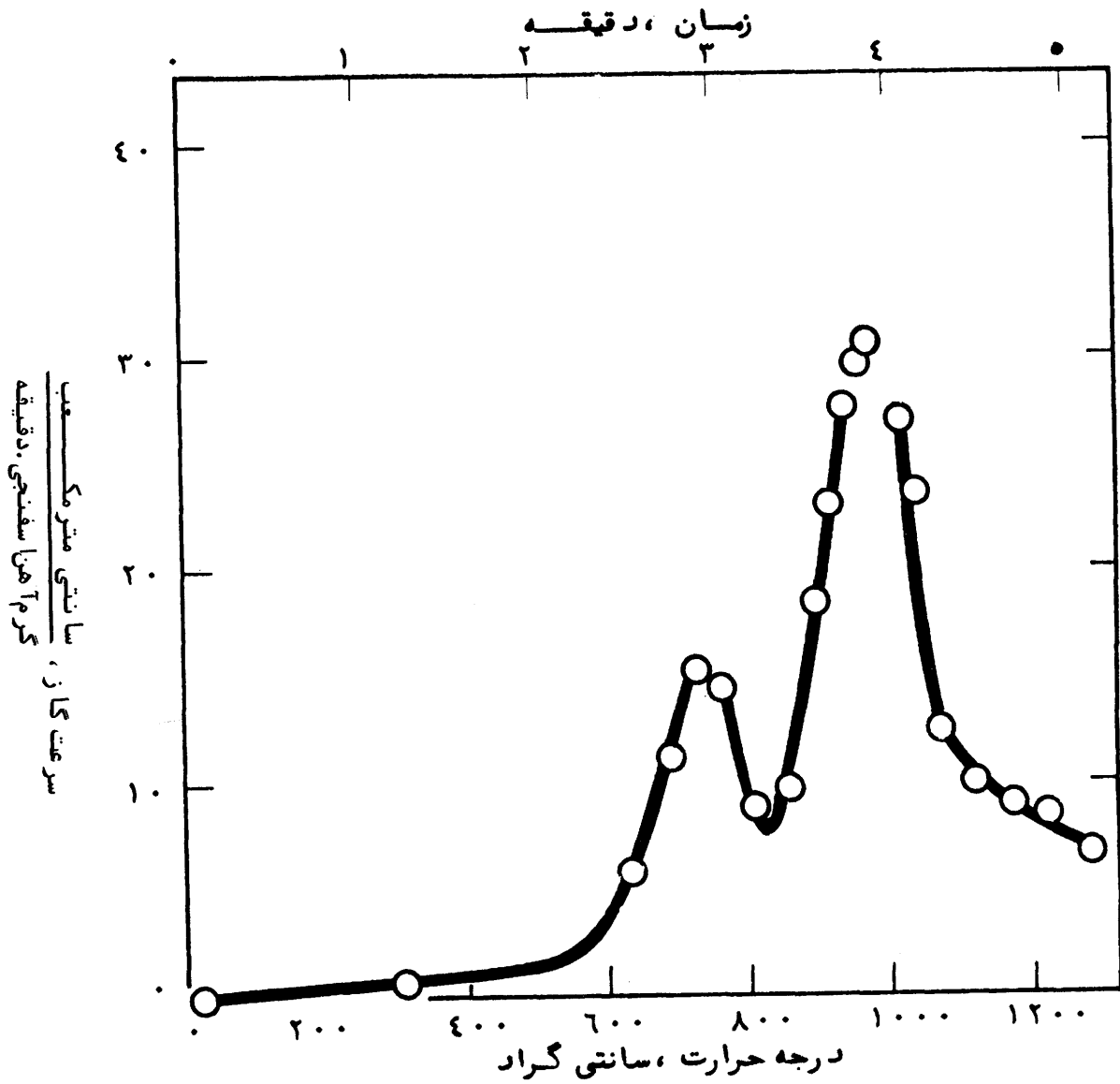
شکل ۲ - توزیع تصویری درجه حرارت در جبهه انجماد



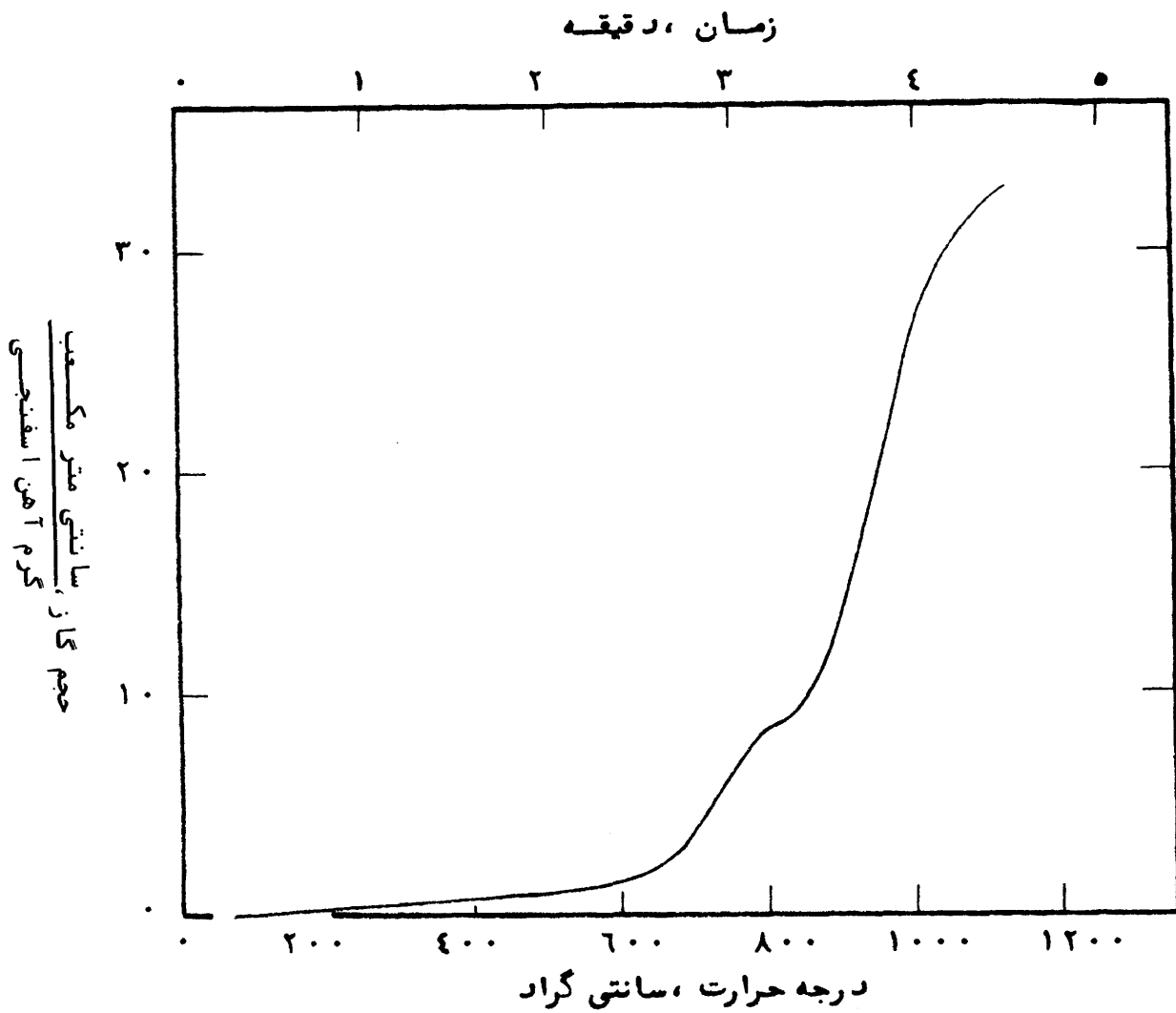
شکل ۳- اثر تلاطم سرباره ۶ حاصل از خروج گاز از یک قطعه ۶ کروی غوطه‌ور برانجماد و ذوب سرباره بر روی آن. قطر قطعه ۳ سانتیمتر، درجه حرارت سرباره مذاب ۱۲۵ درجه سانتی گراد، و ترکیب شیمیایی سرباره فروسیلیکات اشباع شده از آهن می‌باشد. تغییر ضخامت قشر جامد سرباره برای شرایط عدم خروج گاز (منحنی فوقانی) و خروج ۶ لیتر گاز از قطعه در در دقیقه (منحنی تحتانی) نشان داده شده است.



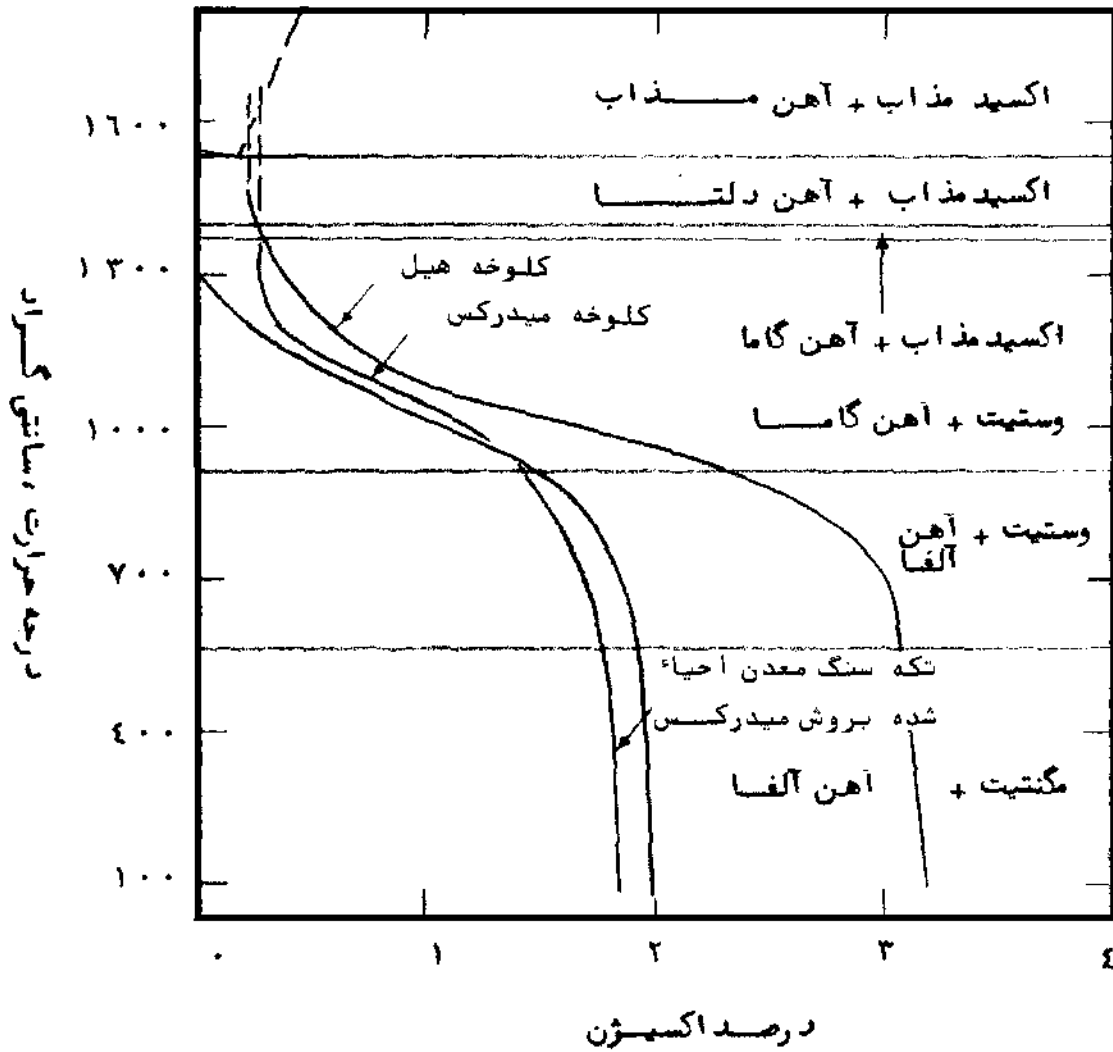
شکل ۴- جدا شدن قطعات منجمد شده ۶ سرباره از سطح قطعه ۶ غوطه‌ور توسط گازهای خارج‌شونده از قطعه



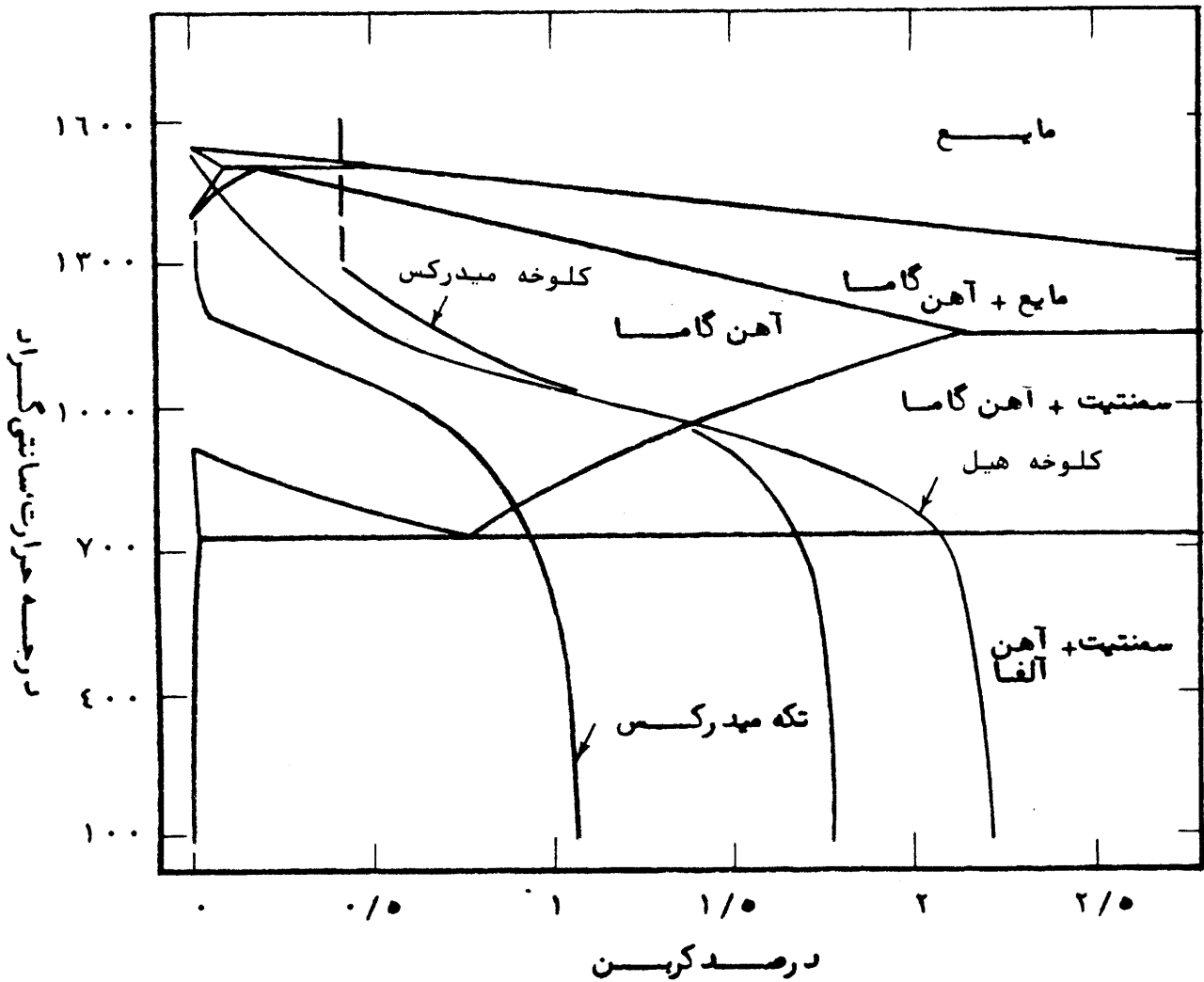
شکل ۷- سرعت خروج گاز از آهن اسفنجی که با سرعت ۲۵۰ درجه سانتی گراد در دقیقه گرم شده است بر حسب درجه حرارت آهن اسفنجی دارای ۳/۲۸ درصد اکسیژن، ۲/۲۳ درصد کربن و حدود ۵ درصد مواد سنگی Gangue است



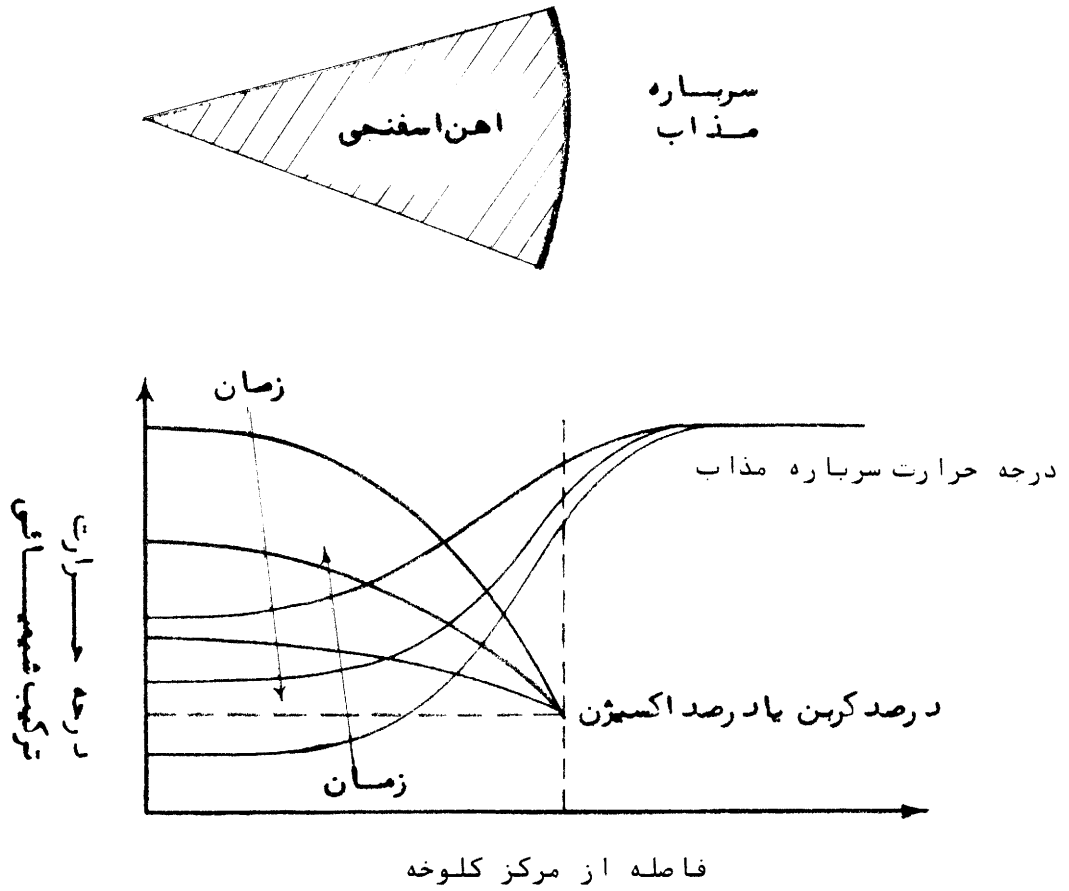
شکل ۸ - حجم گل گازهای خارج شده از آهن اسفنجی بر حسب درجه حرارت آهن اسفنجی .
 درصد اکسیژن آهن اسفنجی ۳/۲۸، درصد کربن ۲/۲۳ و درصد مواد سنگی Gangue
 حدود ۵ است .



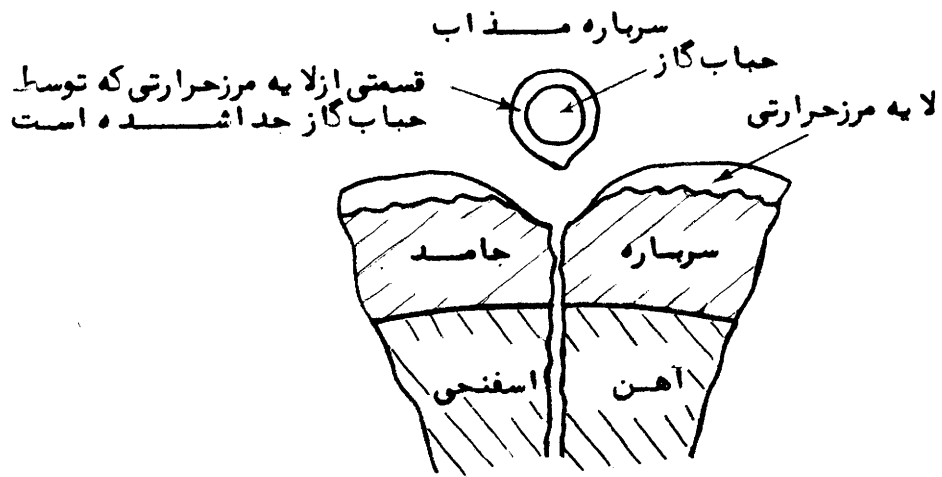
شکل ۹- تطبیق تغییرات درصد اکسیژن سه نوع آهن اسفنجی
 حین گرم شدن و احیاء با دیاگرام تعادلی آهن - اکسیژن. درصد
 اکسیژن کلوخه هیل ۳/۱۹ و کربن آن ۲/۲۲، اکسیژن کلوخه
 میدرکس ۱/۸۰ و کربن آن ۱/۰۷ قبل از شروع آزمایش بوده
 است. دیاگرام تعادلی از ماخذ ۸ نقل شده است.



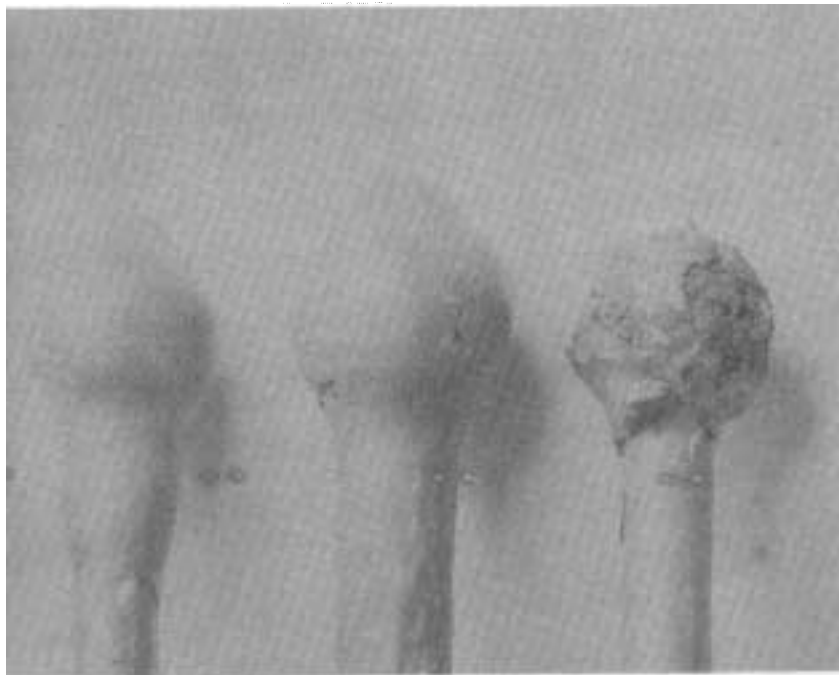
شکل ۱۰ - تطبیق تغییرات در صد کربن سه نوع آهن اسفنجی حین گرم شدن واحیا با دیاگرام تعادلی آهن - کربن . درصد کربن کلوخه هیل ۲/۲۲ و اکسیژن آن ۳/۱۹ ، کربن کلوخه میدرکس ۱/۷۸ و اکسیژن آن ۱/۹۹ و کربن تکه های احیا شده میدرکس ۱/۰۷ و اکسیژن آن ۱/۸۵ قبل از شروع آزمایش بوده است . دیاگرام تعادلی از ماخذ نقل شده است



شکل ۱۱ - نمایش تصویری توزیع درجه حرارت و ترکیب شیمیائی در یک کلوخه آهن اسفنجی غوطه ور در سرباره مذاب قبل از شروع ذوب کلوخه



شکل ۵ - چگونگی جدا ساختن لایه مرز حرارتی موجود در سطح خارجی قطعه غوطه‌ور توسط حباب گاز خارج شونده از قطعه



الف

ب

ج

شکل ۶ - قشر سرباره منجمد شده بر سطح کلوخه‌های آهن اسفنجی
الف - کاملاً فلزی شده - ۹۵ درصد فلزی شده و ج - ۸۷ درصد فلزی شده .