# چگونگی ذوب آهن اسفنجی در کوره هـای فولادسازی

خطیب الاسلام صـــــدرنژاد

## خلاصـه

درک دقیق رفتار کلوخـه هـای آهن اسفنجـی هنگام ذوب درکوره‌های فولاد سازی جهت اصلاح طرح این کوره‌ها وهمچنین اصلاح مشخصه‌های فیزیکی وشیمیایی کلوخه‌های مزبورلازم می‌باشد .دراین مقاله وقایع مربوط به ذوب پیوستهٔ کلوخه‌هـای آهـن اسفنجی درکوره‌های فولاد سازی ،تجزیه وتحلیل گردیده است .هدف بحث ارائه‌روشی است‌جهت بررسی‌کمی‌پدیده‌های‌پیچیده که به دلیل کاربرد صنعتی اهمیت‌می‌یابند .نحوه ترکیب اطلاعات تجربی ویافته‌های آزمایشگاهی به منظور ساختن الگـویـی کـه بتواند میزان‌اثر عوامل موثر برذوب کلوخه‌های آهن اسفنجی درکوره‌های فولادسازی راپیش بینی‌نماید ،به عنوان‌کاربرد آموزنده روش‌فوق مطرح گردیداست . نتیجه عملی این بررسی بهبودو توسعه تکنولوژی ذوب‌وتهیه فلزات می باشد .

## مقدمـه

آهن‌اسفنجی‌را ،که‌ازاحیای‌مستقیم سنگ‌معدن‌به‌دست می‌آید ،می‌توان‌در بسیاری ازکوره‌های تهیهٔ آهن وفولاد بـار نمود. استفاده ازکلوخه‌های پرکربن آهن اسفنجی به عنـوان جزئی‌ازبارکوره‌بلند ، سبب کاهش مصرف کوک وبهبودعملکرد کوره می‌گردد . اما این عمل ،جزدرمواردی که استفاده از بار معمولی سبب کاهش بهره‌دهی کوره گردد ،مقرون به صرفـه نیسـت . استفاده‌از آهن‌اسفنجی در مبدل‌های‌فولاد سـازی نیز ، تنها در شرایطی که تنظیم ترکیب شیمیایی و درجـهٔ حرارت کوره به کمک آن تسهیل گردد ، توجیه پذیـراسـت . میزان‌درصد آهن اسفنجی که سبب ایجاد حداکثر بهره‌دهی درکار کوره بلند (یامبدل‌های تهیه‌فولاد ) همراه باحداقـل هزینهٔ تولید گردد ، بستگی به قیمت‌تمام شدهٔ آهن‌اسفنجی وقیمت تمام شدهٔ کوک داشته ، درشرایطی که‌احیای‌سنگ‌معدن توسط‌گاز طبیعی صورت‌پذیرد ، تابعی ازقیمتهای گاز طبیعـی وکوک می‌باشد . عمده ترین مورد مصرف آهن اسفنجی‌درتهیهٔ فولاد ، از طریق ذوب درکوره‌های قوس الکتریکی است ، کـه درآنها آهن اسفنجی‌می‌تواندجایگزین‌قراضه شـود . مـزیت استفاده ازآهن اسفنجی در روش اخیر ، امکان بارکردن‌مداوم قطعات آن درکوره می باشد که سبب افزایش‌بهره‌دهی تـولید خواهدشـد . برخی از مزایای ذوب آهن اسفنجی درکوره‌های قوس‌الکتریکی درمقالهٔ دیگری (ماخذ ۱ ) قبلا" ذکرشده‌اند .

روش بررسی کمی رفتار قطعات کروی آهن اسفنجـی در کوره‌های قوس الکتریکی به کمک‌الگویی ریاضی کـه از حـل معادلات انتقال حرارت همراه با شرایط حاکم بر محیط ذوب این‌قطعات‌به‌دست‌می‌آید ، در مقالاتی‌که قبلا" به‌چاپ‌رسیده ، آمده‌است . ۴–۲ جهت تعمیم روش مزبور برای ذوب آهـن اسفنجی در سایر کوره‌های فولاد سازی می‌توان شرایط حاکـم برمحیط ذوب دراین‌کوره‌ها را شناسایی‌کرده ، و بجای‌اطلاعات مربوط به کوره‌های‌قوس الکتریکی‌بکاربرد . به منظور طـراحـی وساختن الگوی فوق ، آزمایشات متعددی برای شناسـایـی فرایندهای‌انتقال‌حرارت ،احیای‌نهایی ،انجماد‌سربارهٔ‌مذاب وذوب قطعهٔ جامدغوطه‌ور درسربارهٔ ،وبرای‌یافتن تغییرخواص فیزیکی‌وشیمیایی مواد حین انجام‌عملیات گرم‌شدن وذوب ، انجام شده که نتایج آنها در ساختن الگوی فوق به‌کارگرفتـه شده‌است . ۷–۵

تعیین نقش برخی از پارامترهای موءثر در افزایـش بهره‌دهی تولید درکوره‌های فولادسازی ومحاسبهٔ میـزان‌اثر آنها به کمک مدل فوق قبلا" تعیین و تشریح‌گردیده است . ۷ ازجملهٔ پارامترهای فوق می‌توان مشخصات فیزیکی‌وشیمیایی قطعات جامد ، ظرفیت وابعاد کوره ، روش بارکردن‌ومقدارمواد بارشده‌ومحل‌های ورود بارونحوهٔ توزیع باردرفازهای‌مایـع موجوددرکوره رانام برد .

دراین مقاله‌چگونگی عملکرد کلوخه‌های آهن‌اسفنجی از هنگام ورودشان به‌داخل کوره تاذوب شدن‌کاملشان مـورد بحث‌وبررسی قرار گرفته ،ضمن تشریح حوادثی که منجـربه ذوب کامل این قطعات می‌گردد ، نتایج تحقیقات انجام‌یافته جهت تحلیل این حوادث وکشف علل آنهابه اختصاربیـان شده‌اند . بخش عمدهٔ مقاله به تجزیه وتحلیل نحوهٔ گـرم

شدن وذوب قطعات تکی آهن اسفنجی اختصاص‌یافته ،اثرسایر قطعات موجود درحمام مذاب برعملیات‌ذوب در بخش جداگانه‌ای تشریح ودرپایان طرز تلفیق اطلاعات به‌دست‌آمده جهت ساختن‌الگوی ریاضی مطلوب به اختصارتوصیف گردیده است .

## کلوخه‌های‌تکی آهن‌اسفنجی درکوره‌های‌فولادسازی

هرقطعه آهن اسفنجی ، پس از بارشدن‌درکوره‌فولاد سازی ، به‌محیط سرباره‌ٔمذاب ،که‌به‌علت کم بودن‌وزن‌مخصوص روی فلز مذاب‌قرار دارد ،وارد می‌شود .این قطعه ،به محض ورود درسرباره توسط قشرمنجمد شده‌ای از سرباره‌احاطه‌شده ، دمای‌سطح آن‌افزایش‌می یابد . انتقال حرارت سطح به داخل قطعه ،سبب‌افزایش‌دمای‌داخلی‌وانجام فعل و انفعالات احیای نهایی وتشکیل گازهای منواکسید ودی اکسید کربن گردیده ، خروج این گازها ازداخل قطعه وحرکتشان به‌طرف سطح‌فوقانی حمام‌مذاب‌سبب‌بهم خوردن‌مذاب‌وافزایش‌سرعت‌انتقال حرارت به‌سطح خارجی قطعه جامد می‌گردد .

ادامه‌ٔفعل‌وانفعالات‌احیای نهایی به کاهش اکسیژن وکربن موجود درقطعه‌و تغییر خواصی نظیر وزن مخصوص، تخلخل ، حرارت ویژه ، ضریب انتقال حرارت ،حرارت‌نهان ذوب‌ونقطه‌شروع وخاتمه ذوب قطعه می‌انجامد . جذب حرارت توسط‌واکنشهای‌گرماگیر ، سبب کندشدن سرعت افزایش دما درقطعه وافزایش غیر یکنواختی درجهٔ حرارت در داخل‌آن می‌شود . دیری نمی‌پاید که درجهٔ حرارت سطح قطعه‌شارژشده ، به‌حدی‌می‌رسدکه سرعت انتقال حرارت از سطح به‌طرف‌داخل قطعه‌کمترازسرعت‌انتقال حرارت از حمام مذاب به سطح‌قطعه جامد گشته ، قشرمنجمدشده در سطح قطعه شروع به ذوب‌شدن می‌نماید .ذوب‌این‌قشر باخروج گازهای‌حاصل از احیای نهایی آهن اسفنجی ،هم‌به جهت‌افزایش سرعت انتقال حرارت از حمام مذاب به قطعه جامد به‌علت بهم خوردن حمام مذاب ، وهم باپس‌زدن‌لایهٔ‌سرد‌موجود‌درسطح‌سرباره‌ٔجامد ،تشدید خواهد شد .

بااتمام‌مرحلهٔ‌ذوب‌قشرمنجمد شده، انتقال‌حرارت‌به‌داخل قطعهٔ‌جامد باسرعت بیشتری‌انجام‌گرفته،درجهٔ‌حرارت‌سطح‌قطعه‌به درجه‌حرارت‌ذوب‌آهن‌اسفنجی‌نزدیک می‌شود. در اثرانجام عمل ذوب ،قطعهٔ جامد مرتبا " کوچکتر شده میزان حرارت‌منتقل شده‌به سطح آن ، که متناسب با مساحت سطح قطعه می‌باشد، نیز کاهش می‌یابد .اگرقطعهٔ جامد به صورت کروی باقی‌بماند وقشرذوب شدهٔ‌آن مرتبا " ازسطح قطعه کنار برود ،قطعهٔ‌جامد ازدیدگاه تئوری هرگز به طور کامل‌ذوب نشده ، اندازهٔ آن تنها در زمان‌بینهایت به سمت صفر میل خواهد نمود . به همین جهت نمی‌توان زمان دقیق ذوب کلوخه‌های‌جامدبار شده در کوره رابه کمک الگوهای ریاضی ، براساس کوچک‌شدن مستمرقطعه درشکل کروی آن محاسبه نمود .ولی‌می‌توان‌زمان لازم جهت ذوب‌قسمت عمدهٔ‌حجم‌هر قطعه ( مثلا " ۹۰٪حجم آن )رابه‌عنوان زمان ذوب قطعه در نظر گرفته وبه سهولت محاسبه کرد .

تحولاتی‌که‌حین‌گرم شدن‌وذوب‌قطعات‌تکی‌آهن‌اسفنجی رخ‌می‌دهند ، ذیلا "به‌صورت جداگانه تشریح می‌گردند .

**محیط ذوب شدن قطعات** ازآنجاکه‌وزن‌مخصوص‌کلوخه‌های‌آهن اسفنجی‌عموما "کمتر از وزن مخصوص فلز مذاب می باشد ، قطعات جامداین مواد قبل‌از ذوب شدن کامل ،امکان ورودبه فلز مذاب را نخواهند یافت . این قطعات در صورتی که وزن مخصوصشان‌از وزن مخصوص‌سرباره‌بیشتر باشد ، به طرف فصل مشترک سرباره‌و فلز سقوط‌کرده ودر آنجاتاذوب شدن کامل‌به دام خواهند افتاد .اما درصورتی‌که وزن مخصوصشان ،همانگونه که‌درغالب‌مواردا‌تفاق می‌افتد ،با وزن مخصوص سرباره‌اختلاف قابل توجهی‌نداشته‌باشد ، پس‌از سقوط درحمام مذاب ، در صورتی که شتاب اولیهٔ لازم جهت رسیدن به‌فصل مشترک‌فلز وسرباره‌رانداشته‌باشند، در سرباره‌ٔ مایع غوطه‌ور ودرهمانجا ذوب‌خواهندشد . نمایش تصویری موارد فوق درشکل ۱ آمده است .

از آنجا که ضریب هدایت حرارت فلز مذاب به‌مراتب بیشتر از ضریب انتقال حرارت سرباره‌می‌باشد ، مقدار زیادی از حرارت لازم جهت ذوب قطعات به دام افتاده در فصل مشترک فلز و سرباره از فلز مذاب تاءمین شده ،سرعت‌ذوب قطعات به دام افتاده به مراتب بیشتر از سرعت ذوب قطعات غوطه‌ور درسرباره خواهد بود . در کوره‌های قوسی ، که‌مقدار زیادی‌ازحرارت‌حاصل‌ازقوس‌الکتریکی به‌ٔسرباره‌مذاب‌انتقال می‌یابد ،سقوط قطعات‌فشرده‌آهن‌اسفنجی‌باوزن‌مخصوصی به مراتب بیشتر از وزن مخصوص سرباره به فصل مشترک فلز مذاب وسرباره، سبب سرد شدن فلز مذاب ونتیجتا " کم شدن باز دهی ذوب خواهد شد . دراین نوع کوره‌ها ، سرباره‌ٔ مایع مناسبترین محیط‌جهت ذوب قطعات جامد بار شده‌به داخل کوره بوده ، استفاده ازقطعات آهن اسفنجی ذوب شونده در سرباره ،سبب افزایش بهره دهی‌حرارتی کوره و کم‌شدن‌میزان تابش به سقف ودیوارها ونتیجتا " کاهش میزان تخریب و

خوردگی آنها خواهد گردید . برعکس در مبدل‌های فولادسازی که حرارت حاصل از سوختن ناخالصی‌های موجود در فلز مذاب سبب افزایش درجهٔ حرارت فلز مذاب و ایجاد نیاز به مواد خنک کننده می شود ، استفاده از قطعات فشردهٔ آهن اسفنجی که می‌توانند خود را براحتی به فصل مشترک سرباره وفلز برسانند ، مناسبتر به‌نظر می‌رسد .

نقش وزن مخصوص قطعات جامد بار شونده در کنترل عملیات ذوب در کوره‌های فولادسازی از بحث فوق آشکار می‌شود . نیروی ماند (اینرسی) قطعات بارشده نیز می‌تواند به عنوان عامل موثری جهت کنترل این عملیات به کار گرفته شود . دراین خصوص انجام اندک تغییراتی درطراحی کوره‌های فولادسازی که قطعات آهن اسفنجی به‌طور مداوم در آنها بار می‌شوند ، می‌توان منجربه افزایش سرعت قطعات شارژ شده درهنگام برخورد باسطح مذاب گشته سقوط سریع آنها رابه فصل مشترک سرباره ومذاب سبب گردد .

**انجماد و ذوب شدن سرباره** هرقطعه آهن اسفنجی دربدو ورود به‌داخل سرباره مذاب ، دمائی بمراتب کمتر ازدمای سرباره دارد . نتیجهٔ چنین اختلاف دمایی ، انتقال بسیارسریع حرارت ازسرباره به‌داخل قطعه وبالطبع سرد شدن وانجماد قشرنازکی ازسرباره مذاب مجاور قطعه است . سرباره‌های فولاد سازی غالبا " دارای یک فاصله انجماد نسبتا " بزرگ بوده ، دریک درجهٔ حرارت ثابت تغییر حالت نمی‌دهند . سرعت پیشرفت جبههٔ انجماد ، وساختمان میکروسکوپی سرباره منجمد شده ، تابع عواملی از قبیل موارد زیر می‌باشند :

- مشخصات حرارتی وشیمیایی سرباره مذاب وقطعهٔ غوطه‌ور درآن
- شرایط حاکم برمحیط کوره مانندنحوه‌ومیزان تلاطم سرباره مذاب
- مکانیسم وسرعت خروج گازهای حاصل ازاحیای نهایی قطعه
- چگونگی توزیع قطعات آهن اسفنجی بارشده وحبابهای صعود کننده گاز درکوره .

اندازه‌گیری میزان تاثیر این عوامل نیازبه آزمایشات نسبتا " دقیقی دارد که انجام آنها درشرایطی مشابه شرایط کوره‌های فولاد سازی بسختی امکان پذیر می‌باشد . درشرایطی که توزیع درجهٔ حرارت درجبههٔ انجماد مطابق الگوی تصویری نمایش داده شده درشکل ۲ باشد وانتقال حرارت درمنطقهٔ خمیری به طریق هدایت Conduction صورت پذیرد ، جهت محاسبهٔ سرعت انتقال حرارت ، درجهٔ حرارت جبههٔ انجماد ممکن است برابر درجه حرارت حد بالائی انجماد فرض گردد .

اگر سرباره از نظر شرایط انتقال حرارت درحالت رکود قرار داشته وهدایت حرارت درآن بسختی صورت پذیرد ، سرعت ورود حرارت به سطح قشر منجمد شده تا مدتی کمتر از سرعت خروج حرارت ازآن بوده ، مرتبا " 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 بیشتراز حالت اول بوده ، افزایش ضخامت قشر منجمد به کندی صورت گرفته ، قشرمزبور به زودی شروع به ذوب شدن خواهد نمود ( شکل ۳ ) . در شرایط آزمایشی مربوط به شکل ۳ ، سرباره مذاب توسط گازهای خنثی که باسرعتهای گوناگون ازسوراخهای تعبیه شده درقطعهٔ غوطه‌ور خارج می‌شده ، بهم خورده است . قطعات غوطه‌ور از جنس نیکل وبه صورت کره ( مانند شکل ۴ ) ازطریق ریخته گری دقیق تولید شده وسپس درآنها سوراخهایی تعبیه گردیده است . گازهای خنثی به‌کمک یک لولهٔ فولادی که وظیفهٔ غوطه‌ورنگهداشتن قطعه رانیزبعهده دارد از سوراخهای تعبیه شده درقطعهٔ خارج ومذاب رابهم زده‌است . اثرفعالیت حاصل ازاین نوع بهم خوردن مذاب برضخامت قشرمنجمد شده برروی قطعه ، اندازه گیری شده‌است . شرح کامل روش آزمایش ونتایج حاصله درماخذ ۵ آمده‌است .

بهم خوردن سرباره مذاب نه‌تنها برضریب انتقال حرارت آن اثر افزاینده می گذارد ، بلکه با شکستن قسمتهایی ازساختمان ستونی منجمد شده درجبههٔ انجماد ، درجه حرارت جبههٔ انجماد را تغییر داده برسرعت انتقال حرارت به داخل قطعهٔ منجمد بازهم می‌افزاید . شکستن قطعات جامد سرباره ، دراثر تلاطم فاز مذاب ، غالبا " درحین ذوب سرباره منجمد شده وعقب نشینی جبههٔ انجماد اتفاق می‌افتد . عقب نشینی جبههٔ انجماد وقتی صورت می‌گیرد که دمای سطح قطعهٔ آهن اسفنجی به حدی برسد که سرعت ورود حرارت به جبههٔ انجماد بیشتر از سرعت انتقال حرارت ازجبهه به طرف سطح گردد .

جداشدن قطعات جامد سرباره ممکن است همچنین به‌طور مکانیکی توسط گازهای خارج‌شونده از سطح قطعه ، مطابق الگوی فیزیکی نشان داده شده درشکل ۴ ، صورت گیرد. خروج گاز به صورت اخیر ، نه‌تنهاسبب تلاطم و بهم خوردن سرباره مذاب در اطراف قطعه می‌شود ، بلکه باعث کاهش ضخامت قشر جامد سرباره در اطراف محلهای خروج گاز نیز می‌گردد . با اندازه گیری ضخامت قشر سرباره منجمد شده روی قطعات غوطه‌وردر سرباره مذاب ، کم شدن ضخامت این

قشر دراطراف محلهای خروج گاز وهمچنین کاهش متوسط ضخامت قشر آشکار شده است . [۴] از این مطلب می‌توان‌نتیجه گرفت‌که گازهای خارج شونده از قطعه ، جزایر جامد سرباره‌را که در اطراف قطعهٔ غوطه‌ورتشکیل گردیده‌اند به داخل فاز مذاب‌رانده ، سبب تقلیل ضخامت قشر منجمد شده دراطراف سوراخهای خروج گاز ،می‌گردند . همچنین ممکن است مطابق الگوی نشان‌داده شده درشکل ۵ ، حبابهای گاز درحین‌ترک سطح قطعه ، قسمتهای انتهای ستونهای منجمد شده را همراه‌با بخشهایی‌ازلایهٔ‌مرزحرارتی thermal boundary layer موجوددرسطح قطعه ، با خود به داخل فاز مذاب منتقل نموده ، سبب افزایش ضریب انتقال حرارت وکم شدن ضخامت منطقهٔ خمیری انجماد شوند .

نتایج بررسیهای اولیه در آزمایشگاه نشان داده‌است که‌سوراخهای خروج گاز ،که برسطح پوستهٔ جامد ایجادشده ، غالبا " معدود بوده‌و تعداد شان باافزایش در صد اولیهٔ اکسیژن وکربن موجود درآهن اسفنجی اضافه‌می‌شود . شکل ۶ سه‌نوع‌کلوخهٔ‌آهن‌اسفنجی‌را ،که پس‌از غوطه‌ورشدن درسرباره مذاب وانجمادسرباره‌بر سطحشان از داخل سرباره مذاب به‌سرعت‌بیرون کشیده وسرد شده‌اند ،نشان‌می‌دهند . ترکیب شیمیایی این کلوخه‌ها طوری بوده‌است که میزان گازهای‌خارج شده‌از داخل آنها بترتیب از الف به ج افزوده گردد . مطابق شکل ۶ ، خروج حجم زیاد گاز ازکلوخهٔ‌ج سبب خرد شدن وجداشدن قسمت‌اعظم‌سربارهٔ منجمد شده برسطح قطعه ، گردیده‌است . لازم به تذکراست که خردشدن قسمتی از قشر نازک سرباره پس از بیرون کشیدن کلوخه از داخل سربارهٔ مذاب به علت ادامهٔ خروج گاز وهمچنین به علت تغییرات حجمی سرباره وکلوخه صورت گرفته است .

پس ازاتمام ذوب قشر منجمد شده ، سطح آهن اسفنجی مستقیما " در تماس با سرباره مذاب قرار خواهد گرفت . تماس‌سطح‌قطعه‌با سربارهٔ مذاب سبب افزایش‌ناگهانی سرعت‌انتقال حرارت به داخل قطعه شده ،به‌گرم شدن سریع آن منجر خواهد شد . کاهش اندازهٔ قطعه دراثر ذوب شدن آن سرانجام بارسیدن دمای سطح قطعه به نقطهٔ ذوب آهن‌اسفنجی آغاز خواهد گردید .

**احیای‌نهایی‌وتشکیل گاز** درآهن اسفنجی ،اکسیژن ممکن است به صورت وستیت ویا مگنتیت موجود باشد . کربن نیز ممکن است به هریک از صورتهای‌سمنتیت، حل شده در فاز آهن ،ویا گرافیت‌آزادوجود داشته باشد . باگرم شدن کلوخه آهن‌اسفنجی ،اکسیژن وکربن‌با یکدیگر ترکیب شده وبه صورت گاز منواکسیدویادی اکسیدکربن از کلوخه خارج می‌گردند . با توجه به تعداد فازهایی که ممکن است حامل اکسیژن وکربن باشند ، احیای نهایی آهن اسفنجی می‌تواند مطابق‌واکنشهای متنوعی بیان گردد . آزمایشهای انجام شده برروی نمونه‌های گوناگون ،که درآنها اکسیژن بیشتر به صورت مگنتیت وکربن بیشتربه صورت سمنتیت‌است ،نشان می‌دهند که منحنی‌خروج گاز ازآنها ،وقتی که با سرعتی‌معادل ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد در دقیقه‌یا کمتر گرم شوند ، مشابه منحنی نمایش داده‌شده درشکل۷می‌باشد .این‌منحنی‌هادارای دونقطه اوج دردماهای حدود ۷۵۰ و ۱۰۰۰ درجه‌سانتی‌گراد می‌باشند . درسرعتهای نسبتا " زیاد افزایش دما ، ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد دردقیقه و بیشتر ،تغییراتی درمحل نقاط‌اوج وشکل منحنی بین آنها به وجودمی‌آید که ظاهرا " براثر نایکنواختی‌های حاصل‌در درجهٔ حرارت نمونه ، به سبب سرعت بسیارزیاد افزایش‌دما می باشد .

ازنتایج بررسیهای آزمایشگاهی چنین برمی‌آید که نقطه اوج‌اول ،به‌سبب‌وجود شرایط مناسب‌جهت احیای‌مگنتیت به وستیت در دمائی برابر ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد ، مطابق و اکنشهای۱و۲ پدید می‌آید . درصورتی که نقطه اوج دوم ،بر اثر وجودشرایط مناسب‌جهت احیای وستیت به آهن در دمای حدود۱۰۰۰درجهٔ سانتی گراد ، مطابق‌واکنشهای ۳و۴بوجود می‌آید .

$$Fe_3O_4 + 0.7C = 3FeO_{1.1} + 0.7CO \quad (1)$$

$$Fe_3O_4 + 0.35C = 3FeO_{1.1} + 0.35CO_2 \quad (2)$$

$$"FeO" + C = Fe + CO \quad (3)$$

$$2"FeO" + C = 2Fe + CO_2 \quad (4)$$

شکل منحنی‌های خروج گاز ازآهن اسفنجی رامی‌توان بادر نظر گرفتن شرایط‌گرماپویایی (ترمودینامیکی) وشرایط جنبشی (سینتیکی) لازم جهت پیشرفت واکنشهای فوق ، بسادگی‌توجیه کرد . مقایسهٔ مقادیر گاز تولید شده بامقادیر استوکیومتری مربوط به واکنشهای مزبور ،ارتباط نقاط اوج اول ودوم شکل۷ را بااحیای مگنتیت به‌وستیت و وستیت به آهن تائیدنموده‌است . [۶] کل‌حجم‌گازهای‌خارج‌شده‌از آهن اسفنجی رامی توان بامحاسبه سطح زیر منحنی شکل ۷ به دست‌آورد (شکل ۸) .

تغییر خواص مواد انجام واکنشهای احیای نهایی وخروج گاز ازقطعات آهن‌اسفنجی‌سبب ایجاد تغییرات عمده‌ای درخواص این‌قطعات وخواص مواد مذاب اطراف آنها می‌گردد . یکی ازاین

تغییرات، تغییر نقاط شروع و خاتمه انجماد آهن اسفنجی است که ذیلا" تشریح می‌گردد. در شکل‌های ۹ و ۱۰ تغییرات درصد اکسیژن و کربن سه نوع آهن اسفنجی بر دیاگرامهای تعادلی آهن ـ اکسیژن و آهن ـ کربن منطبق شده‌اند. با مراجعه به این دیاگرامها می‌توان به اثر احیای نهایی بر نقاط شروع و و خاتمهٔ ذوب آهن اسفنجی پی برد. منحنی‌های شکلهای ۹ و ۱۰ نشان می‌دهند که آهنهای اسفنجی نیز مانند سرباره‌های فولاد سازی، غالبا" دارای فواصل ذوب نسبتا" بزرگی هستند با این تفاوت که فاصلهٔ انجماد سرباره‌ها درحین گرم شدن وذوب آهن اسفنجی تا حد زیادی بلا تغییر باقی می‌ماند، در حالی که بخاطر تغییرات ترکیب شیمیائی، فاصلهٔ ذوب آهنهای اسفنجی دستخوش تغییرات وسیعی می‌باشد.

علاوه بر تغییر ترکیب شیمیایی، زینتر شدن قطعات متخلخل آهن اسفنجی در درجهٔ 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 فاصلهٔ ذوب شدن این قطعات اثر بگذارد. تغییر ترکیب شیمیایی قطعات آهن اسفنجی، همچنین برضریب 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، و نوع و میزان ناخالصی‌های آنها می‌باشد، اثر می‌گذارد.

تغییرات خواص شیمیائی 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 قطعهٔ کروی آهن اسفنجی به طور تصویری نشان داده شده است. اختلاف درجهٔ حرارت سطح قطعه با مرکز آن بستگی به قابلیت هدایت حرارت قطعه داشته، هر اندازه قطعه هادی تر باشد این اختلاف کمتر بوده، قطعه زودتر گرم، احیا و ذوب خواهد شد.

خروج گاز از قطعات غوطه‌ور آهن اسفنجی، خواص حرارتی سرباره 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 می‌گذارند. حرکت گازها در فاز مذاب سبب ایجاد تلاطم و نتیجتا" افزایش ضریب انتقال حرارت یا عدد Nusselt فلز مذاب می‌گردد. ضریب هدایت حرارت فاز مذاب بستگی به میزان گازهای مخلوط و ضرایب انتقال حرارت سرباره مذاب و حبابهای گاز دارد. گازهای متصاعد شده چه با سرباره مذاب مخلوط تک فازی تشکیل دهند و چه به صورت فازی جداگانه در سرباره مذاب شناور شوند، سیالیت سرباره مذاب را کاهش داده، زمان ذوب شدن قطعات آهن اسفنجی غوطه‌ور در فاز مذاب را می افزایند.

## 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 فاصلهٔ بین آنها از حد معینی کمتر شود، این قطعات از نظر حرارتی برروی هم اثر گذاشته، رفتارشان دیگر مانند رفتار قطعات مجزی از هم نخواهد بود. سرباره موجود بین این قطعات در این حالت سرد شده، همراه با آنها تشکیل جزایر غوطه‌ور و دیر گدازی را خواهد داد. نسبت سطح به حجم این جزایر به مراتب کمتر از نسبت سطح به 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 برسرعت ذوب مواد و بهره‌دهی عملیات کوره دارد.

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

باتوجه به ابعاد کوره‌های فولاد سازی، درصورتی که بارکردن مداوم قطعات آهن اسفنجی توام با توزیع یکنواخت آنها در فاز مذاب صورت گیرد، افزایش سرعت تغذیهٔ مواد درکوره، تاحد بسیار بالا و بدون ایجاد جزایر دیرگداز امکان پذیر می‌باشد. خروج حجم نسبتا" زیاد گازهای حاصل از احیای نهایی آهن اسفنجی در این گونه موارد، سبب بهم خوردن فاز مذاب و توزیع بهتر قطعات بار شده و نتیجتا" بهبود عملیات ذوب می‌گردد.

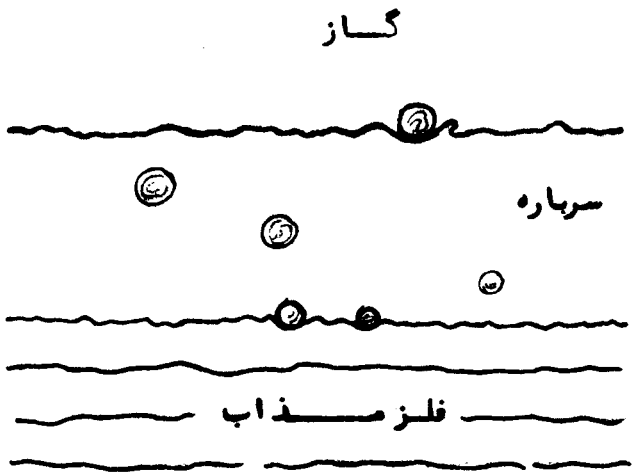
## جمع بندی‌اثرات عوامل‌موءثر در ذوب‌قطعات

اثرات‌کلیهٔ‌عوامل موثر درذوب قطعات بارشدن‌آهن اسفنجی را تنها می‌توان‌دریک الگوی‌ریاضی‌جامع قابل حل‌به وسیلهٔ کامپیوتر جمع نمود ،با حل معادلهٔ انتقال حـــرارت فوریه درمختصات کروی ، توزیع درجهٔ حرارت در یک‌کلوخهٔ کروی غوطه‌ور و موقعیت فصل مشترک جامد ومایع درهرلحظه پس از غوطه‌ور شدن این کلوخه‌به‌دست می آید . برای حـــل این معادله ،لازم است‌شرایط‌حدی معادلهٔ مزبور رابه دقـت مشخص نمود . برای مشخص‌کردن این شرایط می توان میزان گازهای خارج شده از قطعات غوطه‌وررا به کمک آزمایشات‌ساده معین نموده ، به کمک این مقادیر ، خواص مواد جامد و مـواد مذاب وتغییرات آنها وهمچنین عدد Nusselt فازمذاب را با استفاده از روابط‌تجربی موجود برحسب درجهٔ حرارت محاسبه ودرالگوی ریاضی فوق قرارداد . ۷ـ۶ از آنجـــا که شرایط و خواص حرارتی فاز مذاب اطراف کلوخه ونیز خواص شیمیائی ،فیزیکی ،و حرارتی خود کلوخه توابعی از درجـهٔ حرارت کلوخه وزمان پس ازغوطه‌وری آن می‌باشند ، لـــذا لازم‌است کلیهٔ روابط‌ومعادلات فوق به روش عددی مرحله‌به وتواما "حل‌شوند . الگوی جامع به دست آمده از حل‌معادلات فوق ، می تواند جهت پیش‌بینی عملکرد کلوخه‌های‌گوناگـون آهن اسفنجی در کوره‌های‌فولاد سازی مورد استفاده‌قرارگرفته ، برای‌محاسبه‌اثر عوامل مختلف مانند ترکیب‌شیمیایی ،اندازه ،و وزن مخصوص قطعات بارو همچنین شکل وابعاد کوره‌های‌تولید فولاد برسرعت ذوب کلوخه‌ها وبهره‌دهی تولید دراین کوره‌ها به‌کار گرفته شود . شناسایی موثرترین مشخصه‌های‌آهن‌اسفنجی وکوره‌های ذوب وپیش‌بینی میزان اثر این مشخصه‌هابرسرعـت ذوب کلوخه‌های آهن اسفنجی از عمده‌ترین موارد استفـادهٔ چنین الگویی خواهند بود .

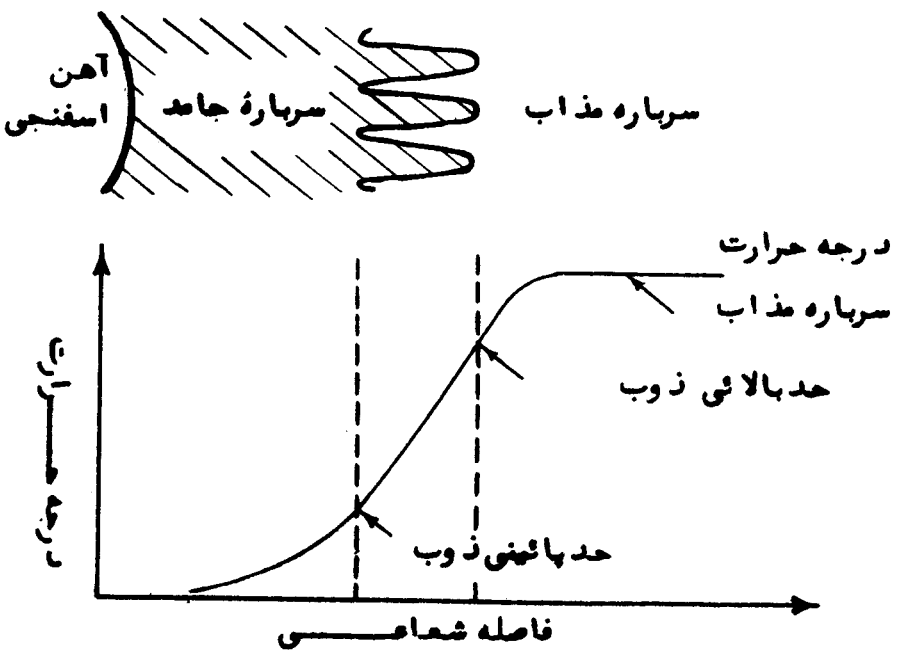
## مآخـذ

۱ـ صدرنژاد .سمینارذوب آهن۱۳۵۹ (نقدوبررسی روشهای احیای‌مستقیم برای‌تولید آهن وفولاد درایران) .

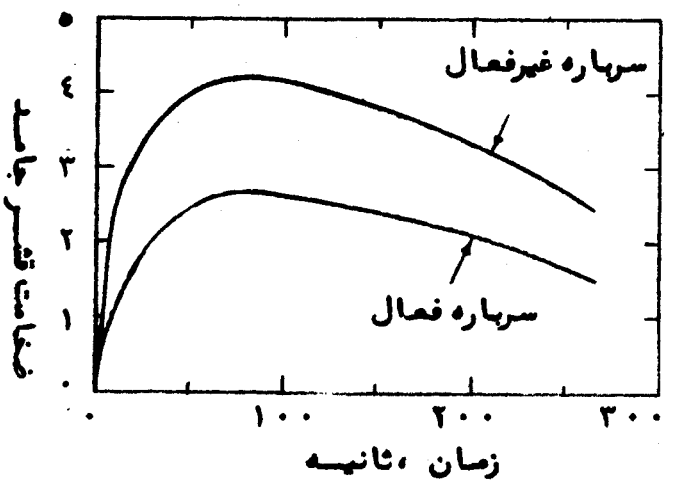
2. Elliott and Nauman:*Proc, Int. Symp. on Slags, Metals and Gases*, Electrochem. Soc., Toronto, Canada,PP. 238-250, May 1975.
3. Numan, Foo and Elliott:*Proc., Int. Symp. on Copper Extraction and Refining*, TMS-AIME,Las Vegas,Nev., Feb. 1976.
4. Elliott,Mauman and Sadrnezhaad:*Proc. Int. Iron and Steel Cong.*, TMS-AIME, Chicago, Illinos,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.



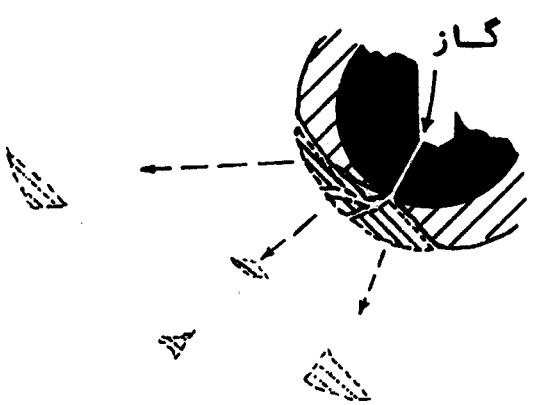

شکل ۱ ــ کلوخه‌های آهن اسفنجی درکورهٔ فولاد سازی



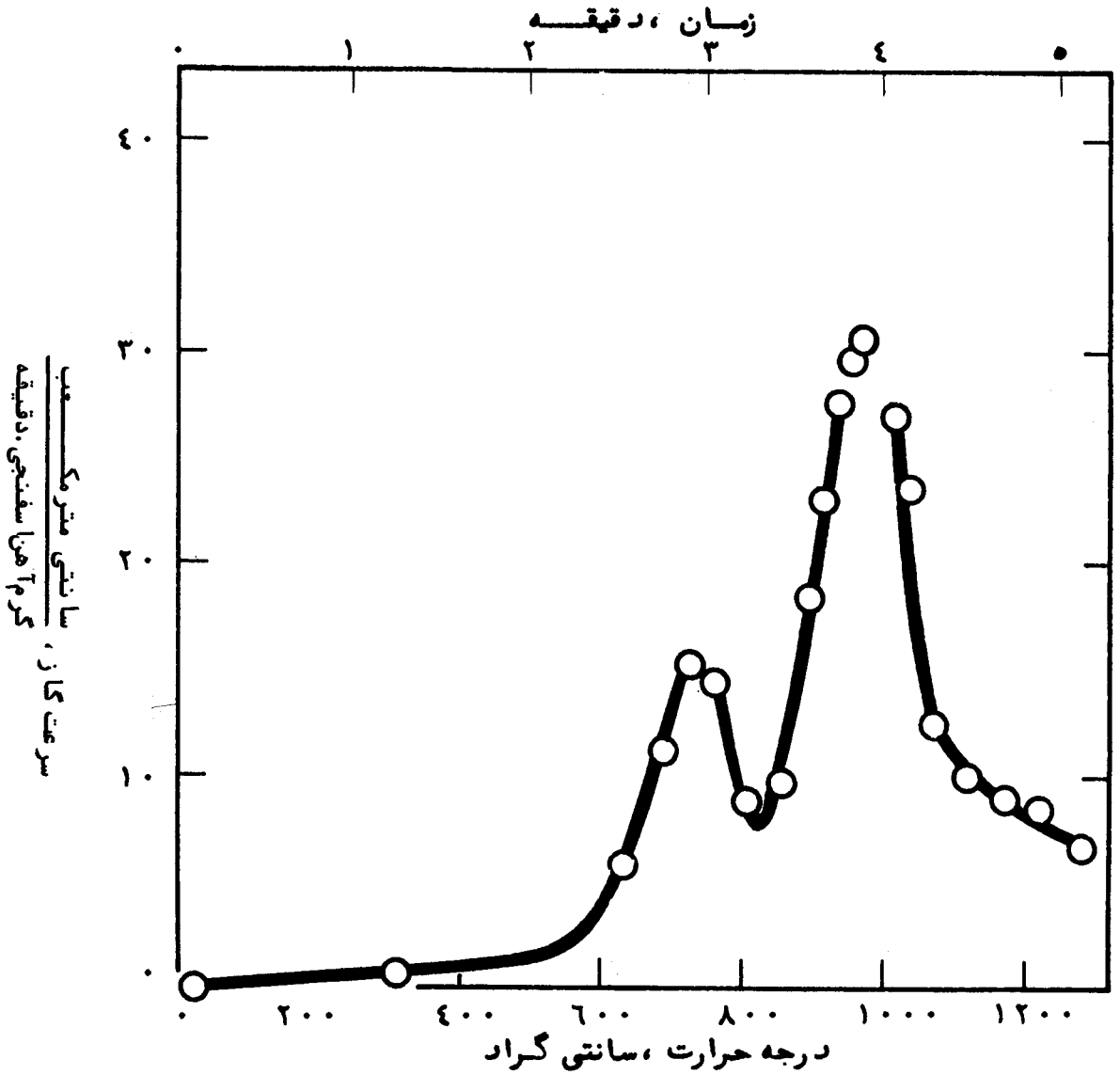

شکل ۲ــ توزیع تصویری درجه ٔ حرارت درجبههٔ انجماد



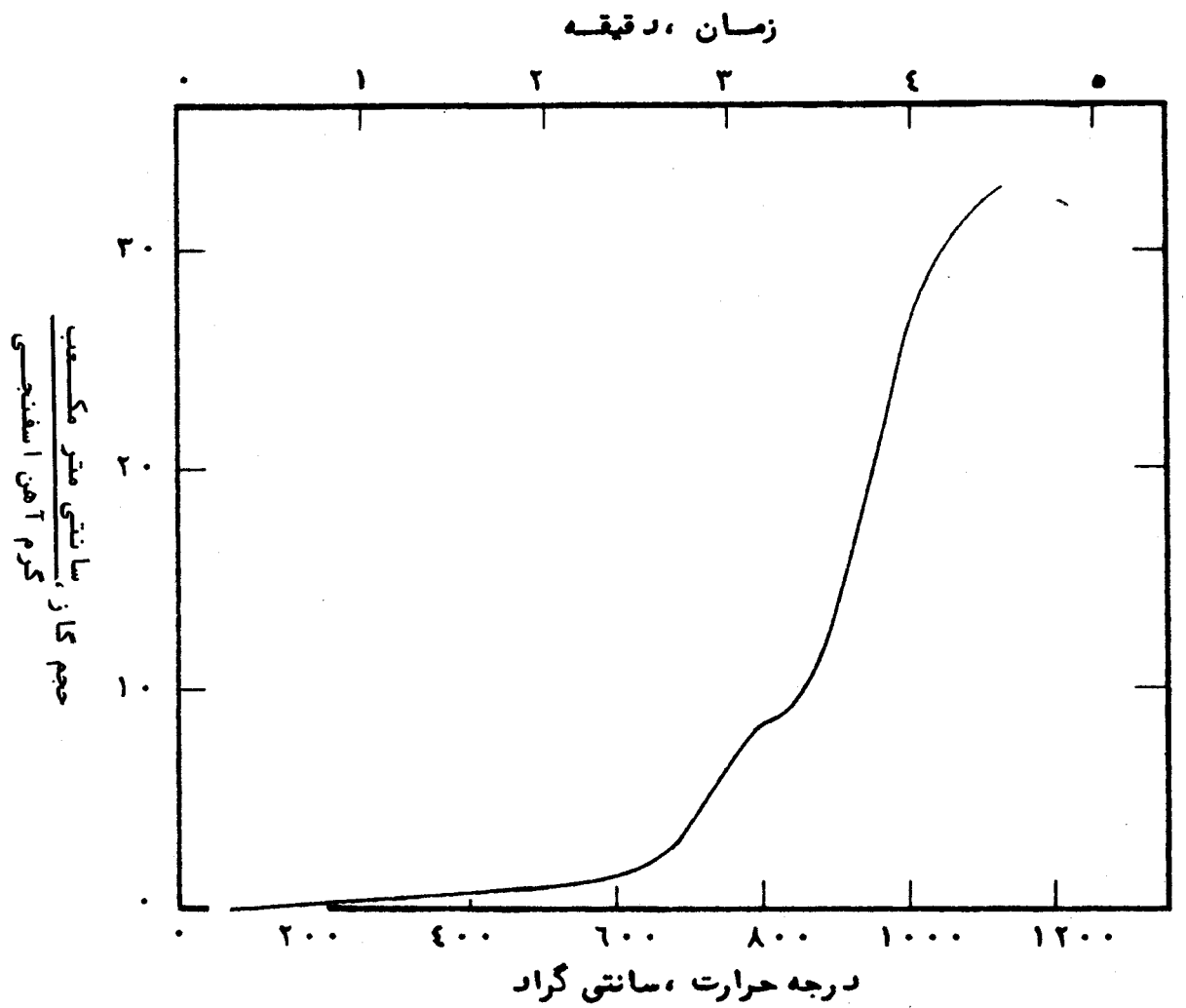

شکل۳ـ اثر تلاطم سرباره‌ٔ حاصل از خروج گاز از یک قطعه‌ٔ کروی غوطه‌ور برانجماد و ذوب سرباره برروی آن . قطرقطعه ۳ سانتیمتر ، درجه حرارت سرباره مذاب ۱۲۵۰ درجه سانتی گراد ، و ترکیب شیمیایی سرباره فروسیلیکات‌اشباع شده از آهن می‌باشد . تغییر ضخامت قشر جامد سرباره برای‌شرایط عدم خروج گاز ( منحنی فوقانی) وخروج ۶ لیتر گاز از قطعه ور در دقیقه ( منحنی تحتانی ) نشان داده شده است .



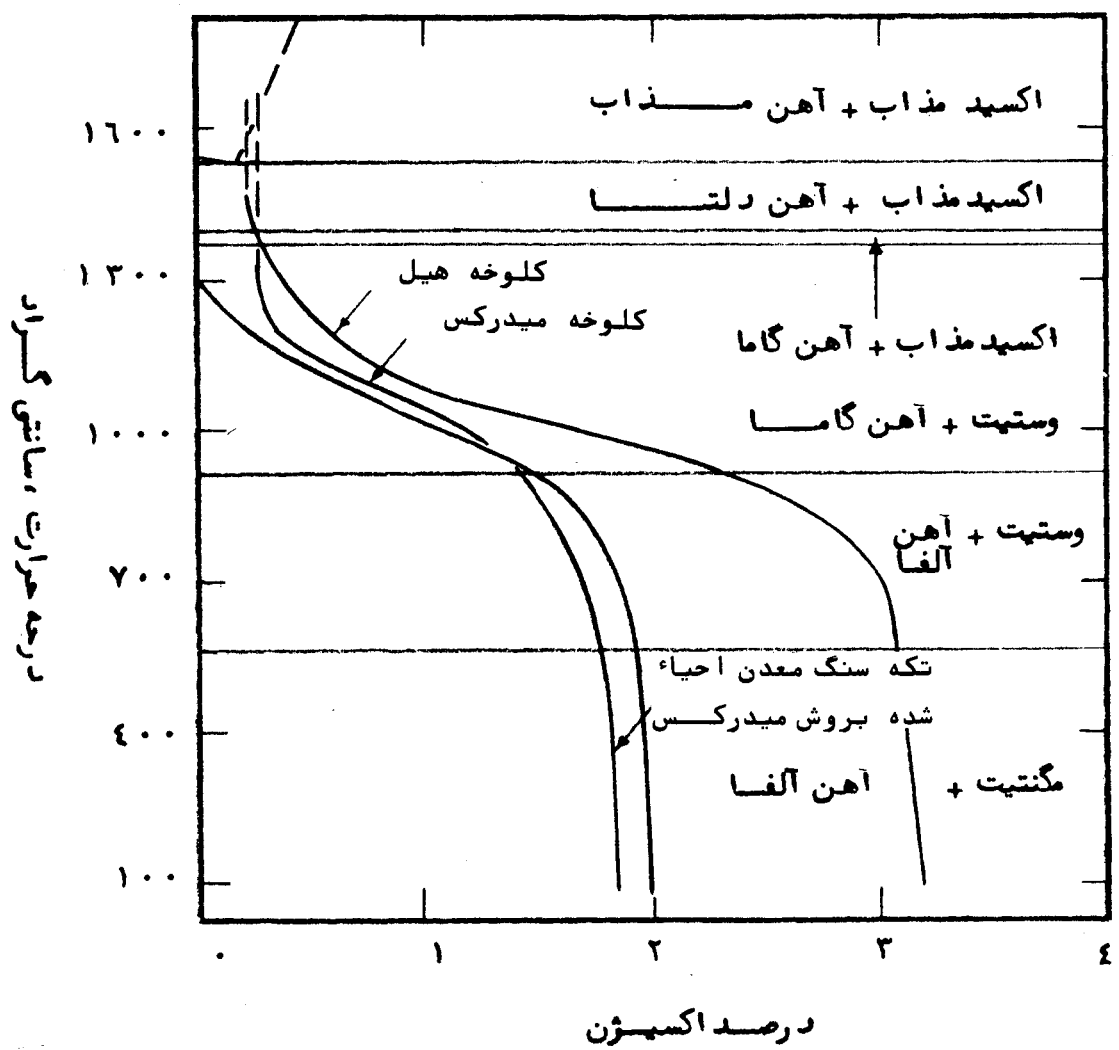

شکل ۴ـ جدا شدن قطعات منجمد شده‌ٔ سرباره از سطح‌قطعه‌ٔ غوطه‌ور توسط گازهای خارج‌شونده‌از قطعه



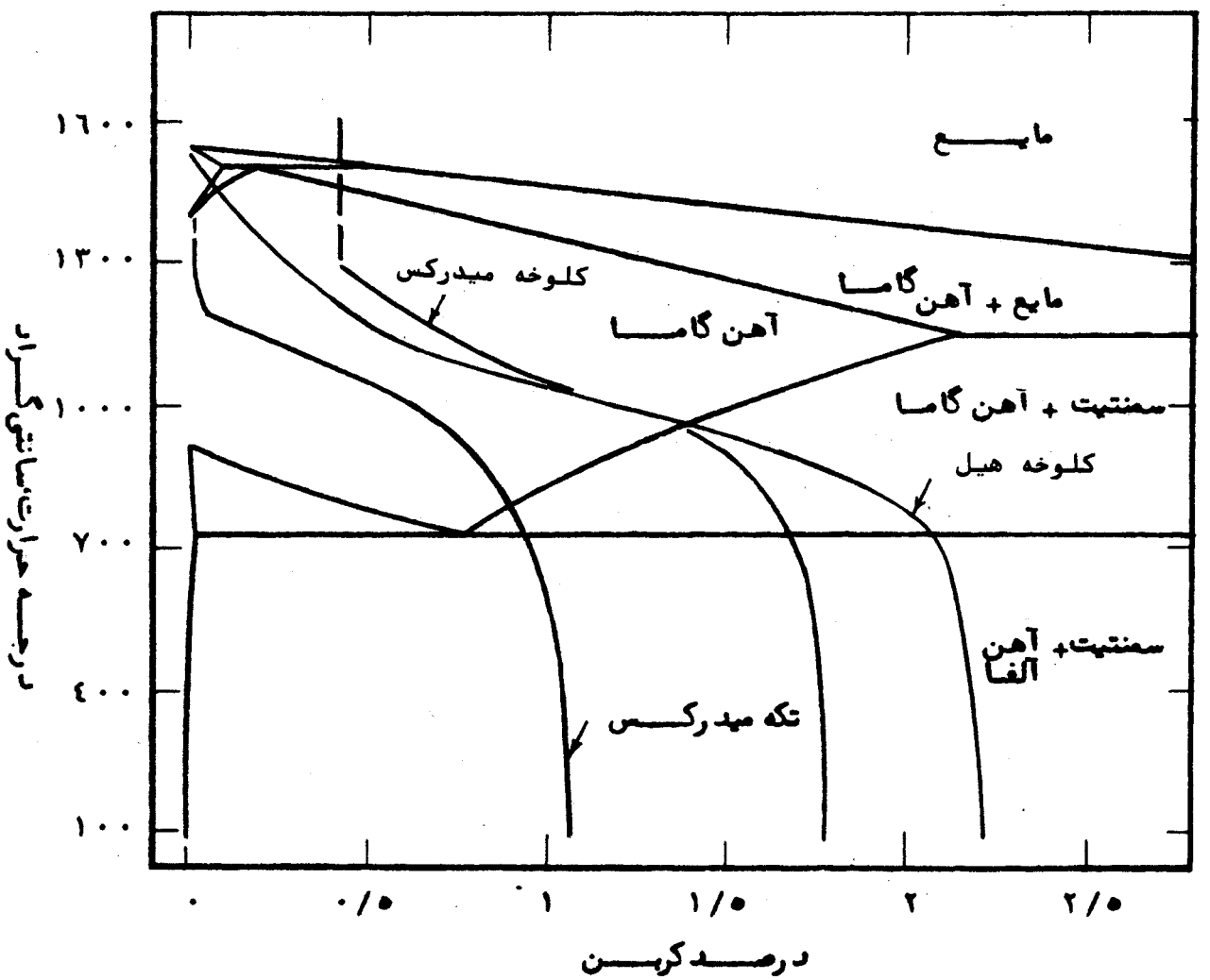

شکل ۷ــ سرعت خروج گاز از آهن اسفنجی که با سرعت ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد در دقیقه گرم شده است برحسب درجهٔ حرارت آهن اسفنجی دارای ۳/۲۸ درصد اکسیژن ، ۲/۲۳ درصد کربن و حدود ۵ درصد مواد سنگی Gangue است



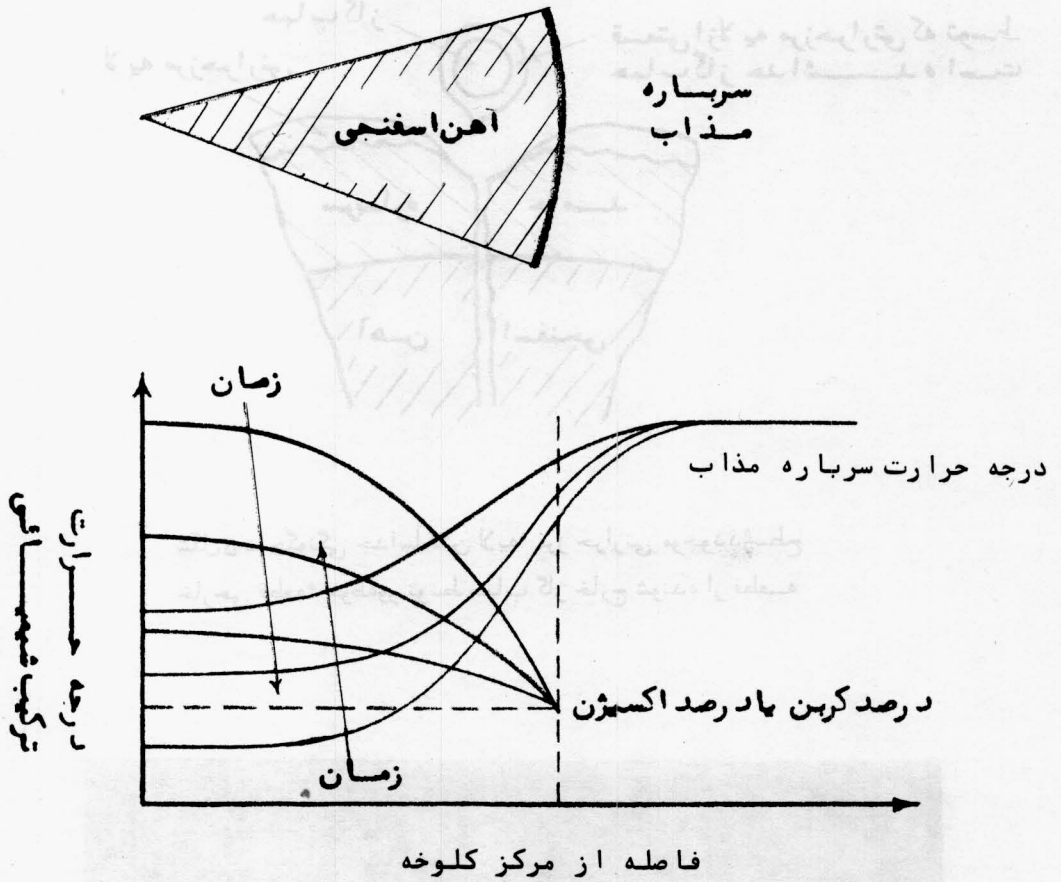

شکل ۸ ــ حجم گل گازهای خارج شده‌از آهن اسفنجی برحسب درجه حرارت آهن اسفنجی.
درصد اکسیژن آهن اسفتجی ۳/۲۸، درصد کربن ۲/۲۳ و درصد مواد سنگی Gangue
حدود ۵ ایست.



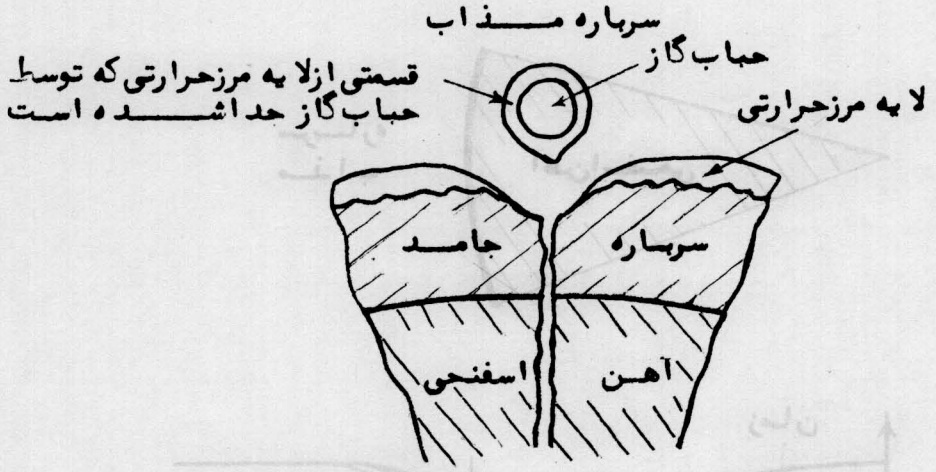

شکل ۹ــ تطبیق تغییرات درصد اکسیژن سه نوع آهن اسفنجی حین گرم شدن واحیا با دیاگرام تعادلی آهن ــ اکسیژن. درصد اکسیژن کلوخه هیل ۳/۱۹ وکربن آن ۲/۲۲، اکسیژن کلوخه میدرکس ۱/۸۰ وکربن آن ۱/۰۷ قبل از شروع آزمایش بوده است. دیاگرام تعادلی از ماخذ ۸ نقل شده است.



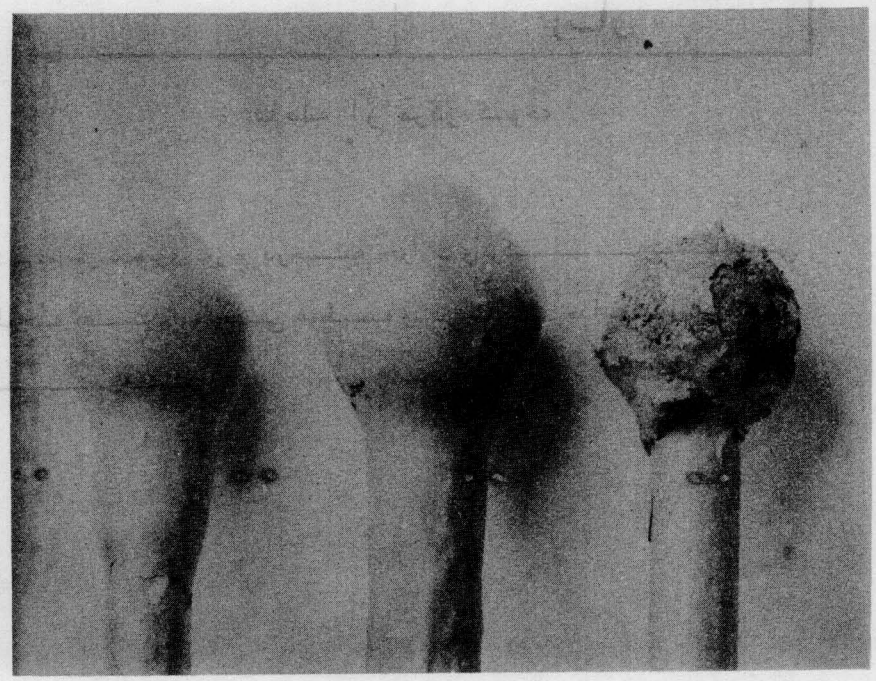

شکل ۱۰ ــ تطبیق تغییرات در صد کربن سه‌نوع آهن اسفنجی حین گرم‌شدن واحیابادیاگرام تعادلی آهن ــ کربن. درصد کربن کلوخه هیل ۲/۲۲ واکسیژن آن ۳/۱۹، کربن کلوخه میدرکس ۱/۷۸ واکسیژن آن ۱/۹۹ و کربن تکه‌های احیا شده‌میدرکس ۱/۰۷ واکسیژن آن ۱/۸۵ قبل‌ازشروع‌آزمایش‌بوده‌است. دیاگرام تعادلی‌ازماخذ ۸نقل‌شده‌است.




شکل ۱۱ ـ نمایش تصویری توزیع درجهٔ حرارت و ترکیب شیمیائی دریک کلوخه آهن اسفنجی غوطه ور در سربارهٔ مذاب قبل از شروع ذوب کلوخه




شکل ۵ ــ چگونگی جداساختن لایهٔ مرز حرارتی موجوددرسطح خارجی قطعهٔ غوطه‌ور توسط حباب گاز خارج شونده از قطعه



ج ب الف

شکل ۶ ــ قشرسربارهٔ منجمدشده برسطح کلوخه‌های آهن اسفنجی
الف ــ کاملا" فلزی شده ب ــ ۹۵ در صد فلزی‌شده و ج ــ ۸۷ درصدفلزی‌شده .