

فرایندهای خوردگی در آجرهای نسوز کوره ذوب شیشه و روش‌های بهینه نگهداری و تعمیر آن

ابوالقاسم امامی^۱، نیما فخیم هاشمی^{۲*}

۱- مشاور ارشد مدیرعامل در امور کوره‌ها، شرکت شیشه همدان (سهامی عام)

۲- مدیر واحد مهندسی صنایع و تحقیق و توسعه، شرکت شیشه همدان (سهامی عام)

پیام‌نگار: research@hamadanglass.com

چکیده

نخستین کوره‌های ذوب شیشه از خشت و گل ساخته می‌شده و سوخت آن‌ها بیشتر چوب بوده است. به مرور زمان این کوره‌ها تغییر و بهبود یافت و به جای خشت و گل، بدنه آن‌ها از آجرهای نسوز ساخته شد و امروزه با ابداع نسوزهای مختلف عمر این کوره‌ها از چند ماه به بیش از ۱۰ تا ۱۵ سال رسیده است. کوره‌های ذوب شیشه محفظه‌های حرارتی‌ای هستند که در آنها شیشه تحت تاثیر گرمای ناشی از سوخت، یا برق ذوب می‌شود. در این مقاله کوره‌های ذوب شیشه و مسایل مربوط به آنها با رویکردی تجربی و کاربردی مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌اند تا بتوانند برای صنایع شیشه سازی مفید واقع شوند. ابتدا بخش‌های اصلی یک کوره ذوب شیشه بررسی شده و عوامل سویی که ممکن است باعث کاهش عمر کوره گردد شناسایی و معرفی شده‌اند و فرضیات مختلف در این خصوص مطرح و مورد بحث قرار گرفته‌اند. همچنین به نحوه انتخاب نسوز مناسب برای بخش‌های مختلف کوره نیز پرداخته شده است. در پایان نیز مواردی در ارتباط با نگهداری و تعمیر بخش‌های مختلف کوره بیان گردیده است.

کلمات کلیدی: صنعت شیشه، کوره ذوب شیشه، آجرهای نسوز، ری جنراتور، نگهداری و تعمیرات

۱- مقدمه

نخستین کوره‌های ذوب شیشه از خشت و گل ساخته می‌شد و بیشتر در آنها چوب، به عنوان سوخت مورد استفاده قرار می‌گرفته است. با گذشت زمان کوره‌ها بهبود یافتند و بدنه آنها به جای خشت و گل، از آجرهای نسوز ساخته شد و اکنون با ابداع نسوزهای مختلف، عمر این کوره‌ها از حدود چند ماه به بیش از ۱۰ تا ۱۵ سال رسیده است. کوره ذوب شیشه می‌تواند بصورت یک محفظه شیمیایی در نظر گرفته شود که در آن مواد خام مانند سیلیکات، سودا، خاکستر و غیره توسط واکنش‌های حالت جامد-مایع به شیشه تبدیل می‌شوند. تمام واکنش‌های شیشه در دمای بالا

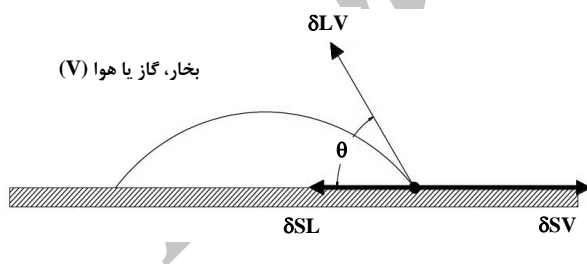
فن و هنر شیشه سازی از دیرباز برای بشر شناخته شده بوده است. برخی اسناد قدیمی نخستین شیشه‌سازی را به فنیقی‌ها نسبت می‌دهند که به حدود ۳۰۰۰ سال قبل از میلاد برمی‌گردد. فنیقی‌ها بیشتر از راه دریانوردی زندگی می‌گذراندند و فرض است هنگامی که گیاهان دریایی در اجاق‌هایی ساخته شده از سنگ‌های آهکی و ماسه (مخلوط آهک و سیلیس)، سوزانده می‌شدند شیرابه‌های شفاف و تیره رنگی که همان شیشه بود بر سطح این اجاق‌ها پدیدار می‌شد و از این پدیده صنعت شیشه سازی برای بشر شناخته شد [۱-۳].

مشاهده نگردیده باز هم خوردگی نسوز در آن ناحیه زیاد بوده است. در مورد علت خوردگی شدید در این ناحیه عقایدی مختلف ابراز شده است که در زیر به شرح آن‌ها پرداخته شده است.

اختلاف دما در بالا و پایین: این نظریه چندان مورد قبول نیست زیرا در آزمایش‌های آزمایشگاهی در یک بوتله نسوز که اختلاف دمایی در بالا و پایین شیشه وجود ندارد باز هم در طولانی مدت، خوردگی در بالا به مراتب شدیدتر از پایین است این امر در آزمون میلگردهای زاک به طور کامل آزموده شده است.

اختلاف چگالی: اگر در اثر حل نسوز در مذاب، چگالی زیاد شود محصولات واکنش به پایین رفته، و سطح، عاری از محصولات مذکور می‌گردد. بنابراین واکنش خوردگی در بالا شدید است ولی این مساله عمومیت ندارد به عنوان مثال در شیشه‌های کریستال سرب، چگالی مذاب بالا است و با حل شدن نسوز در شیشه چگالی کمتر می‌شود. در این حالت نیز مشاهده شده که خوردگی در بالا شدیدتر است.

شیب کشش یا انرژی سطحی: این فرضیه از همه محتمل‌تر است و برای آن که به این مقوله پرداخته شود مفهوم "تر شدن" یک جامد توسط یک مایع به شرح زیر مورد بررسی قرار می‌گیرد. وقتی یک قطره مایع روی یک سطح جامد ریخته می‌شود دو حالت ممکن است اتفاق بیفتد. حالت نخست:



شکل ۱- حالت نخست [۳]

مطابق شکل (۱)، می‌توان نوشت:

$$\delta SV = \delta SL + \delta LV \cos \theta$$

که در این رابطه: δSV : انرژی سطح مشترک بین جامد و هوا، δSL : انرژی سطح مشترک بین جامد و مایع، δLV : انرژی سطح مشترک بین مایع و هوا، θ : زاویه تر شدن

(حدود $150^{\circ}\text{C} - 1450^{\circ}\text{C}$) در یک فضای احاطه شده از نسوزها رخ می‌دهند [۴]. امروزه با اطمینان می‌توان گفت که در داخل کشور تخصص مربوط به نگهداری و تعمیرات کوره‌ها پیشرفت زیادی کرده و علم و دانش مربوط به این موضوع در نزد بیشتر دست‌اندرکاران صنعت شیشه کشور موجود است و مسایلی که در ادامه به آن پرداخته شده به احتمال زیاد برای بیشتر این کارشناسان، امر جدیدی نیست، ولی از آنجا که امروزه به علت پاره‌ای از مشکلات لازم است کوره‌های تولید شیشه خیلی بیش از نرم استاندارد کار کنند، بیان این موارد خالی از فایده نخواهد بود. ضمن معرفی بخش‌های مهم و گلوگاهی کوره‌های ذوب شیشه، نکات ضروری برای دوام و بیشینه کردن عمر کوره‌ها در ادامه بیان شده‌اند.

۲- مبانی نگهداری بهینه کوره

ابتدا لازم است برای شناخت مبانی مهم مربوط به عمر کوره‌ها، اجزای اصلی یک کوره ذوب شیشه که همان نسوزها هستند و به عنوان آستری کوره محسوب می‌گردند بررسی شده، و عوامل سویی که باعث کاهش عمر آن‌ها و در نهایت کاهش عمر کوره می‌گردد شناسایی شوند. در این مقاله به کوره‌هایی که در آن‌ها شیشه سودالایم ذوب می‌گردد پرداخته شده زیرا درصد بالایی از شیشه‌های تولیدی در دنیا از این نوع هستند. اکنون به تشریح بخش‌های مهم یک کوره که به عنوان بخش‌های بحرانی محسوب شده و محدود کننده عمر کوره هستند پرداخته شده است.

۲-۱ بدنه جانبی

بدنه جانبی در تماس با مذاب عمدتاً از نسوز AZS^۱ نوع ذوب و ریخته‌گری بوده و بیشتر در ناحیه خط ذوب^۲ دچار فرسایش شدید می‌گردد. فلاکس لاین در قطعات جانبی کوره‌های شیشه، منطقه‌ای است که در آنجا خوردگی زیاد است، شاید دلیل ابتدایی اطلاق این نام به این منطقه آن بوده که در مواردی سولفات واکنش نکرده زیادی بر سطح مذاب جمع شده و باعث خوردگی می‌گردد ولی این تعریف چندان صحیح نیست زیرا در برخی مذاب‌های شیشه که حتی بر سطح آن‌ها کوچک‌ترین اثری از تجمع فلاکس (سولفات)

۱. مخفف Alimina Zirconia Silica است که با روش ذوب و ریخته‌گری تهیه شده و نسبتاً گران و در مقابل خوردگی مذاب شیشه بسیار مقاوم هستند.
2. Flux-Line

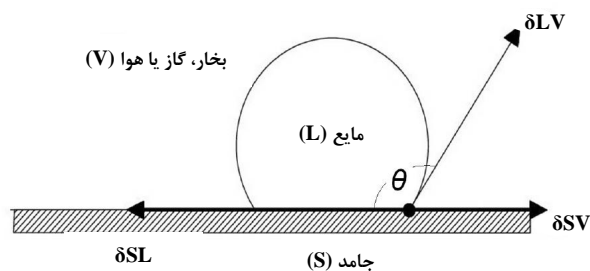
به تعادل و کاهش انرژی آزاد سیستم بایستی سطح مشترک بین مایع و گاز به حداقل برسد بنابراین قطره باران تمایل دارد شکل تقریباً کروی به خود بگیرد. مذاب شیشه در حمام قلع در فرایند تولید شیشه شناور تمایل دارد خود را کاملاً بر سطح قلع مذاب بگستراند زیرا انرژی سطح مشترک بین مذاب قلع و هوا (کشش سطحی قلع) به مراتب بیشتر از انرژی سطح مشترک بین مذاب شیشه و هوا است بنابراین سطوح مشترک قلع مذاب و هوا سطوح پراثری محسوب شده و برای ایجاد تعادل در سیستم و کاهش انرژی آزاد باید این سطوح به حداقل برسند، دلیل بدون موج بودن و نداشتن تلرانس ضخامت در شیشه‌های شناور همین مساله است. از کلیه موارد ذکر شده چنین استنتاج می‌گردد که در اثر تماس مذاب با آجر، اگر مذاب خوب آجر را خیس کند خوردگی شدید خواهد بود زیرا مذاب، سطح بیشتری از نسوز را در بر می‌گیرد و علاوه بر آن طبق قانون لوله‌های مویینه، مذاب به سادگی به داخل تخلخل‌های باز نسوز نفوذ کرده و باعث خوردگی آجر از درون نیز خواهد شد. بالعکس اگر مذاب، نسوز را تر نکند خوردگی کاهش پیدا می‌کند. معمولاً سرباره‌های فلزات بیش از مذاب فلزات سطح نسوز را تر می‌کنند بنابراین اثرات خوردگی آن‌ها بر سطح نسوزها بسیار شدید است، مذاب شیشه نیز سطح نسوزها را به خوبی تر می‌کند و از نظر خوردندگی شبیه سرباره فلزات است به همین جهت در سال‌های اخیر تلاش بر این بوده که در بعضی کاربردها با افزودن موادی مثل گرافیت به ناحیه خط ذوب میزان تر شونده‌ی نسوز را در تماس با مذاب شیشه به حداقل برسانند (مانند بدنه آجرهای نسوز شاموت در حمام قلع).

یکی از عوامل مهم در خوردگی نسوز در تماس با مذاب، ضخامت لایه ساکن مرزی است. لایه ساکن مرزی لایه بسیار نازکی است که به آجر چسبیده و به علت اصطکاک تحت تاثیر جریان‌های جابه‌جایی قرار نمی‌گیرد به همین جهت به لایه ساکن موسوم است و چون مرز بین مذاب اصلی و نسوز است لایه مرزی نیز نامیده می‌شود. عامل اصلی خوردگی آجر، نازک شدن این لایه مرزی است چون واکنش خوردگی از این لایه و صرفاً توسط دیفیوژن^۱ به کندی صورت می‌گیرد اگر لایه ضخیم باشد واکنش خوردگی کم می‌شود و بالعکس. عواملی که باعث نازک شدن لایه مرزی می‌گردند به ترتیب

۱. نفوذ Diffusion (انتقال مولکول به مولکول در اثر گرادیان غلظت است).

مشخصه δLV معمولاً به کشش سطحی مایع موسوم است. هرچه سطح مشترک بزرگ‌تر باشد انرژی سطح مشترک بیشتر خواهد بود. در این حالت $\delta SV > \delta SL$ و $\theta < 90^\circ$ ، سطوح مشترک جامد و گاز سطوح پراثری هستند که بایستی به حداقل برسند بنابراین، این سطوح با مایع پوشانده می‌شوند. طبق اصل ترمودینامیک هر چه انرژی آزاد یک سیستم بیشتر باشد ناپایدارتر است و برای رسیدن به حالت پایدار بایستی انرژی آزاد آن کم شود. اگر انرژی سطح مشترک بین جامد و هوا بیشتر از انرژی سطح مشترک بین جامد و مایع باشد یعنی $\delta SV > \delta SL$ بنابراین $\cos\theta > 0$ و در نتیجه $\theta < 90^\circ$ است در این حالت گفته می‌شود که مایع جامد را تر می‌کند پس به طور کلی می‌توان گفت که اگر در تماس یک مایع با جامد زاویه خیس شدن حاده باشد مایع جامد را تر می‌کند. به عنوان مثال می‌توان یک قطره آب بر روی یک سطح غیر چرب را بیان کرد.

حالت دوم:



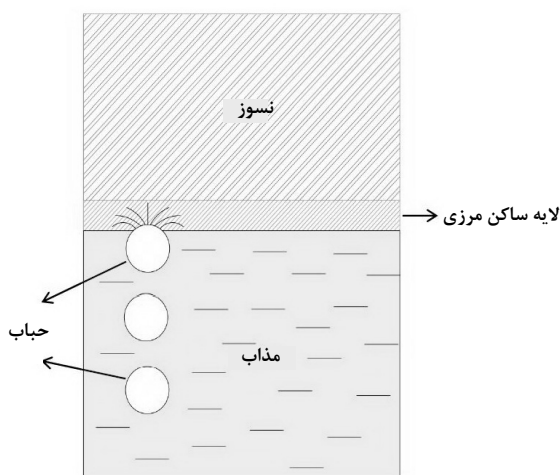
شکل ۲- حالت دوم [۳]

اگر انرژی سطح مشترک بین جامد و مایع بیشتر از انرژی سطح مشترک بین جامد و هوا باشد $\delta SV < \delta SL$ برای کاهش انرژی آزاد و نزدیک شدن به حالت تعادل، مایع تمایل دارد سطح مشترک خود را با جامد کم کند در این حالت $\theta > 90^\circ$ است و سطوح مشترک جامد و مایع سطوح پراثری هستند پس باید به حداقل برسند. در اینجا زاویه خیس شدن منفرجه است، در این حالت گفته می‌شود که مایع، جامد را تر نمی‌کند. مثال این مورد یک قطره آب روی یک سطح چرب است و چنان که در شکل بالا (شکل ۲)، مشاهده می‌گردد به شکل گلوله در می‌آید. برای روشن‌تر شدن این امر به قطره باران و نحوه گسترش شیشه بر روی سطح حمام قلع در فرایند تولید شیشه شناور می‌توان اشاره کرد. در ریزش باران سطوح مشترک بین آب و هوا سطوح پراثری هستند بنابراین برای رسیدن

می‌دهد بنابراین محصولات حاصل از انحلال Al_2O_3 (شیشه غنی از Al_2O_3) از سطح دور شده و شیشه تازه جای آن را می‌گیرد. در حقیقت این جابه‌جایی که از نظر ماهیت یک جابه‌جایی آزاد است باعث می‌گردد که غلظت محصولات تولیدی در سطح کاهش یابد و به همین دلیل، مذاب در سطح تمایل دارد مقادیر بیشتری از Al_2O_3 را در خود حل کند و به همین جهت این سطح هیچگاه به اشباع نمی‌رسد و جابه‌جایی آزاد ناشی از شیب کشش سطحی باعث می‌گردد که ضخامت لایه مرزی کم شده، سرعت دیفیوژیون و در نتیجه خوردگی تشدید گردد.

۲-۲ نواحی افقی که از زیر با مذاب تماس دارند (گلوگاه‌ها و نظایر)

پدیده خوردگی (به سمت بالا) یا خوردگی حباب^۳ شبیه پدیده خوردگی در خط ذوب است و بیشتر در سطوح افقی در تماس با مذاب یعنی گلوگاه‌ها^۴ و درزهای افقی بین دو ردیف بلوک جانبی مخزن ذوب شیشه رخ می‌دهد (در فناوری‌های قدیمی در تولید شیشه به خصوص شیشه جام، مخازن بلوک‌ها دو ردیف بودند که در صورت امکان بتوان از ردیف پایین آن در یک دوره کاری دیگر کوره استفاده کرد). در شکل (۳) مذاب از زیر با یک سطح افقی نسوز در تماس است [۳].



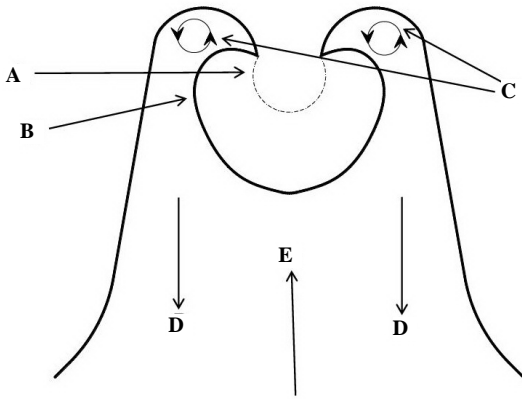
شکل ۳- تماس مذاب با یک سطح افقی

کاهش گرانیوی، جابه‌جایی طبیعی^۱، جابه‌جایی اجباری^۲ می‌باشند. در تماس نسوز زاک با مذاب شیشه این لایه مرزی، مذاب غنی از Al_2O_3 است زیرا در میان دو جزء مهم موجود در آجر زاک یعنی Al_2O_3 و ZrO_2 (به میزان کمتر و به صورت فاز شیشه است)، حلالیت Al_2O_3 در شیشه بیشتر از ZrO_2 است. اگر در حوالی این لایه مرزی هیچگونه جابه‌جایی صورت نگیرد پس از مدتی یک مذاب اشباع از Al_2O_3 حاصل شده که باعث توقف عمل خوردگی بر اثر دیفیوژیون می‌گردد. ولی با توجه به وجود حرکت‌های جابه‌جایی (طبیعی یا اجباری) در حوالی این لایه مرزی این میزان اشباع شدن دائما از بین می‌رود و خوردگی ادامه پیدا می‌کند. طبق گفته‌های قبلی از عوامل موثر بر ضخامت این لایه مرزی، گرانیوی است که به دما بستگی دارد. در لایه‌های نزدیک به سطح مذاب، دما بسیار بالاتر از لایه‌های زیرین است به همین جهت در مخازن ذوب شیشه لایه‌های فوقانی توسط دمیدن هوا از پشت نسوز خنک می‌شود و در حقیقت با این کار و با کاهش دما در این لایه، گرانیوی زیاد شده و نهایتاً ضخامت لایه مرزی افزایش می‌یابد و بدین ترتیب سرعت عمل دیفیوژیون و در نتیجه میزان خوردگی کاهش می‌یابد [۳ و ۵]. پیش از این عنوان شد که بررسی‌های همه‌جانبه موید این امر است که عامل اصلی خوردگی در ناحیه خط ذوب شیب کشش سطحی است. برای روشن‌تر شدن این مطلب یک اصل یا قانون شیمی- فیزیکی به شرح زیر بیان می‌گردد:

اگر ناخالصی‌هایی در یک مذاب (یا یک مایع) حل شوند و کشش سطحی آن را بالا ببرند تمرکز محصولات حاصل از واکنش انحلال در بالای سطح (حوالی سطح مشترک) کمتر از پایین سطح (نقاط دورتر از سطح مشترک) است. دلیل این امر آن است که وقتی انرژی سطح مشترک بین مایع و هوا (کشش سطحی) در اثر انحلال یک جامد در یک مذاب زیاد می‌شود، سطح، تمایل دارد که برای رسیدن به پایداری سیستم، از انرژی خود بکاهد بنابراین موادی که باعث افزایش کشش سطحی شده‌اند از سطح دور می‌شوند و بدین ترتیب غلظت این مواد در اعماق مذاب به مراتب بیشتر از سطح مذاب است [۳]. همانطور که قبلاً نیز عنوان گردید انحلال‌پذیری Al_2O_3 در مذاب به مراتب بیش از ZrO_2 است و براساس آزمایشات صورت گرفته، حل شدن Al_2O_3 در مذاب شیشه، کشش سطحی را افزایش

3. Bubble Drilling یا Upward Drilling
4. Throat

1. Natural Convection
2. Force Convection



شکل ۴- شمای عمل UWD در مورد حباب هوا در یک تکه یخ غوطه ور در محلول (۵۰-۵۰) آب و متانول

A: در این ناحیه چون حباب به آجر کاملاً چسبیده است بنابراین مذاب تازه با این قسمت از سطح حباب تماس نگرفته و خوردگی ایجاد نمی‌گردد بنابراین قسمتی از آجر به صورت کله قند در مرکز حباب باقی مانده و در اطراف آن حفره ایجاد می‌گردد.
 B: حباب گاز در حالی که موادی با کشش سطحی پایین در سطح آن جذب شده‌اند.
 C: جریان‌های گردابی ناشی از گرادبان کشش سطحی که باعث به هم زدن محلول و افزایش میزان انحلال می‌شوند.
 D: ترکیباتی با کشش سطحی بالا
 E: حلال تازه (در مورد کوره‌های ذوب شیشه به مذاب تازه شیشه اطلاق می‌گردد)

۲-۳ ری جنراتورها و مسایل خوردگی آنها

ری جنراتور^۳ و ری کوپراتورها^۴ پیش گرم‌کن هوای احتراق کوره‌های ذوب شیشه هستند. چون مسایل مربوط به ری جنراتورها بیش از ری کوپراتورها است در اینجا به ذکر موارد مربوط به ری جنراتور پرداخته شده است. ری جنراتورها حرارت ناشی از گازهای گرم خروجی را گرفته و به هوای احتراق انتقال می‌دهند [۶ و ۷]. اگر ری جنراتور جدید از نظر فناوری به روز باشد بیش از ۶۵ درصد انرژی حرارتی محسوس موجود در گازهای حاصل از احتراق را به

ثابت شده است که حباب گاز موجود در توده مذاب همواره ترکیباتی که دارای کشش سطحی پایینی هستند را بر سطح خود جذب کرده و بنابراین سطح حباب همواره دارای انرژی سطحی پایینی است. زمانی که حباب گاز به لایه مرزی می‌رسد (گفتیم که در مورد نسوزهای زاک و آلومین، این لایه مذاب، غنی از Al_2O_3 است) اگر این لایه مرزی بر سطح حباب باقی بماند انرژی سطحی حباب را افزایش می‌دهد. (زیرا انحلال Al_2O_3 در مذاب، انرژی سطحی را بالا می‌برد) بنابراین مذاب غنی از Al_2O_3 سریعاً از سطح حباب دور شده و مذاب تازه دائماً با حباب در تماس است (زیرا کشش سطحی مذاب تازه کمتر از لایه مرزی بوده و حبابی که پیش‌تر گفتیم همواره ترکیباتی با کشش سطحی پایین را بر سطح خود جذب می‌کند و بیشتر تمایل دارد که با مذاب تازه، تماس حاصل کند تا لایه مرزی). در نتیجه این عمل، لایه مرزی در تماس با حباب کاملاً در هم ریخته و مغشوش می‌گردد. در حقیقت مذاب تازه بر سطح حباب قرار گرفته و چون تمایل زیادی به انحلال Al_2O_3 آجر را در خود دارد، مانند یک مته، حفره‌ای عمودی و رو به بالا در آجر ایجاد می‌کند به همین جهت به این عمل خوردگی به سمت بالا^۱ (UWD) یا خوردگی حباب^۲ می‌گویند (چون این نوع خوردگی ناشی از حباب است به این اسم نیز نامیده می‌شود). اگر بخواهیم این عمل را با خوردگی در خط ذوب مقایسه کنیم می‌توان گفت که در خط ذوب جابجایی طبیعی حاصل از شیب کشش سطحی، باعث نازک شدن لایه مرزی و تشدید خوردگی است ولی در UWD جابجایی اجباری ناشی از حرکت سریع حباب رو به بالا طبق قانون استوکس باعث ایجاد تلاطم و در نتیجه از بین رفتن لایه مرزی در ناحیه تماس با حباب و تماس مستقیم بدنه نسوز با مذاب تازه می‌گردد. بدین جهت خوردگی ناشی از این پدیده بسیار شدیدتر از حالت قبل (خوردگی در ناحیه خط ذوب) بوده و به همین علت است که در گلوگاه‌های کوره‌های ذوب شیشه که این پدیده وجود دارد، نسوزهایی با مقاومت‌های عالی در برابر خوردگی به کار می‌برند. در شکل (۴) شمای عمل UWD در مورد حباب هوا در یک تکه یخ که در محلول (۵۰-۵۰) آب و متانول غوطه‌ور است در دمای $5^{\circ}C$ - نشان داده شده است.

3. Regenerator
4. Recuperator

1. Upward Drilling (UWD)
2. Bubble-Drilling

دانه‌بندی جدید) علاوه بر گرفتگی چکرها شدت تشکیل حباب ریز^۵ را در محصول زیاد می‌کند.

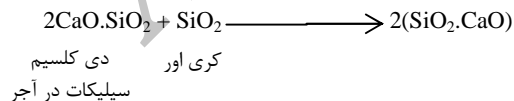
(پ) **رطوبت بیج**: هرچه بیج خشک‌تر باشد پراکندگی اجزای آن در شبکه چکرها بیشتر است.

(ت) **شرایط کار**: یکی از مهمترین شرایط کار، دما و چگونگی توزیع آن در شبکه چکر است. واضح است که چون دما عامل تسریع واکنش است بنابراین واکنش‌های خوردگی چکر با افزایش دما افزایش می‌یابد.

(ث) **نوع سوخت**: سوخت‌های مایع نظیر مازوت (نفت سیاه) که هنوز هم در بسیاری از کوره‌ها در دنیا به عنوان سوخت معمولی استفاده می‌شود (چون گاز طبیعی، سوخت گرانی است)، حاوی مقادیر زیادی وانادیم و گوگرد است که این مواد در گاز طبیعی یا اصلاً وجود ندارند (مانند وانادیم) یا به مقدار بسیار کم در گاز تصفیه شده (گاز شیرین) موجود است (مانند گوگرد). متاسفانه گازهای طبیعی مصرفی در ایران حتی پس از تصفیه مقادیر زیادی گوگرد دارند.

(ج) **عوامل مضر و واکنش‌های انجام شده در چکرها**: عوامل مختلف از قبیل مواد جامد، بخارات و گازهای حاصل از فرآوری، بیج، تبخیر از سطح میزب شیشه و سوخت، واکنش‌های زیر را در لایه‌های مختلف چکر انجام می‌دهند:

سیلیس: اگر دانه‌بندی سیلیس خیلی ریز باشد و به مقدار زیادی در چکرها پراکنده شوند، به صورت زیر واکنش می‌دهند. در لایه‌های فوقانی که عمدتاً آجر منیزیته است (اگر با پیوند دی کلسیم سیلیکات باشد)، واکنش زیر انجام می‌شود:



ترکیب حاصل (SiO_2 , CaO) ولاستونیت^۶ است، دی کلسیم سیلیکات با دیرگدازی 2100°C در این واکنش به ولاستونیت با دیرگدازی 1500°C تبدیل می‌شود که بدین ترتیب با تخریب پیوند آجر، باعث انهدام تدریجی آن می‌شود. بایستی به این نکته توجه شود که اگر آجر منیزیته از منیزیته‌های معدنی تهیه شود حتی

هوای احتراق منتقل می‌کند که به این عدد بازدهی ری جنراتور گفته می‌شود. امروزه به جز معدودی از کوره‌های ذوب شیشه بیشتر آن‌ها مجهز به ری جنراتور است در حقیقت ری جنراتورها به منزله ریه‌های کوره بوده و از این رو جزء نواحی بحرانی هستند. عمده نواحی آسیب‌پذیر داخل ری جنراتورها چکرها^۱ هستند، چکرها از نظر منطقه‌ای به نواحی زیر تقسیم می‌گردند:

لایه‌های فوقانی (I): در این لایه بسته به میزان کشش و نوع شیشه دما معمولاً از 1400°C تا 1600°C متغیر است این لایه‌ها عمدتاً از ۴ الی ۵ ردیف تشکیل شده اند. یکی از عوامل مضر که در این لایه‌ها باعث مشکل می‌گردد ذرات ریزدانه سیلیس، آهک، دولومیت و شیشه خرده هستند که تحت عنوان فرابری یا کری اور^۲ وارد ری جنراتور شده و سریعاً شبکه‌های بالایی را مسدود می‌کنند.

لایه‌های فوقانی (II): دما در این لایه‌ها معمولاً از 1300°C تا 1400°C متغیر است. تعداد ردیف این لایه‌ها از ۶ تا ۷ عدد است. لایه‌های میانی: این ناحیه به منطقه سولفات^۳ موسوم است و دمای آن معمولاً از 1100°C تا 1250°C متغیر است.

لایه‌های زیرین: دما در این لایه‌ها معمولاً از 800°C تا 1000°C است.

۲-۳-۱ عوامل موثر در آسیب‌پذیری چکرها

(الف) **بج^۴ و نوع آن از نظر ترکیب**: ذرات جامد یا بخاری که در فرابری وجود دارند، در حقیقت همان اجزای بیج هستند که وارد شبکه چکر می‌شوند، بنابراین نوع و ترکیب بیج در واکنش‌های چکر اهمیت به سزایی دارد.

(ب) **دانه‌بندی بیج**: واضح است که هرچه دانه‌بندی اجزای تشکیل دهنده بیج ریزتر باشد میزان مواد پراکنده شده در شبکه چکرها بیشتر است. این مواد با نسوزهای چکر تماس گرفته، با آن‌ها واکنش نموده و آن‌ها را از بین می‌برند و یا باعث گرفتگی شبکه چکرها می‌شوند (گرفتگی چکرها با سولفات و نرمه مواد بیج عمدتاً سیلیس و گاهی دولومیت و آهک). سیلیس ریزدانه زیر ۲۰۰ میکرون (مطابق

1. Checkers
2. Carry over

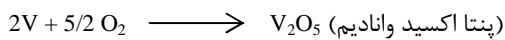
۳. دلیل نامیدن این ناحیه به ناحیه سولفات آن است که سولفات سدیم عمدتاً در این ناحیه تشکیل شده و مشکل‌ساز می‌گردد.

۴. باز: Batch (مخلوط همگونی از مواد اولیه با نسبت های معین برای خوراک دهی کوره [۶])

5. Seed
6. Wollastonite

۱۵۰۰°C می‌کند، این واکنش به تدریج لایه‌های منیزیتی فوقانی را از بین برده و آن‌ها را کلوخه می‌کند.

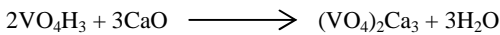
ترکیبات وانادیم: مقادیری وانادیم در نفت خام موجود است که پس از تقطیر آن در برج تقطیر تقریباً تمام آن در مازوت باقی می‌ماند. این ماده تحت تاثیر اتمسفر شدیداً اکسیدی کوره، واکنش‌های زیر را انجام می‌دهد:



V_2O_5 با بخار آب موجود در فضای کوره ترکیب شده و اسید اورتوانادیک می‌سازد.



اسید اورتوانادیک در درجات حرارت بالاتر از ۱۴۰۰°C (دمای معمولاً موجود در لایه‌های فوقانی چکرها) به راحتی با CaO موجود در پیوند آجر منیزیتی ترکیب شده و اورتوانادات کلسیم را می‌سازد.



اورتوانادات کلسیم ماده رقیق و زودگذاری است (نقطه ذوب حدود ۱۳۰۰°C) که کشش سطحی آن پایین است بنابراین طبق قانون مویبگی، این ماده به راحتی در تخلخل آجر نفوذ کرده و چون ماده‌ای زودگذار است و به راحتی پیوند آجر (اگر آجر دارای پیوند دی کلسیم سیلیکات باشد) را در خود حل می‌کند بنابراین بافت آجر را منهدم می‌سازد. قدرت تخریبی این واکنش به خصوص در درجات حرارت بالاتر از ۱۴۰۰°C خیلی زیاد است. علت آن که آجرهای منیزیتی با پیوند دی کلسیم سیلیکات در کوره‌های نفت سوز به مراتب بیش از کوره‌های گازسوز آسیب می‌بینند، همین نکته است. اثر تخریبی دیگر ترکیبات وانادیم بر روی بافت آجر نسوز آن است که رشد دانه‌های پریکلاس (فاز MgO موجود در آجر منیزیتی) را زیاد می‌کند (خاصیت کانی سازی یا کاتالیزوری)، بنابراین اگر کوره مازوت سوز باشد حتی اگر نسوز منیزیتی در اتصال مستقیم و کم آهن نیز به کار برده شود باز هم وانادیم اثرات نامطلوبی را بر آن به جای می‌گذارد. به همین جهت است که امروزه در بیشتر کشورهایی که به دلیل گران بودن گاز طبیعی ناگزیر به استفاده از سوخت مازوت هستند، گزینه آجر فیوز مولایت به جای نسوز منیزیتی توسط برخی کارشناسان فنی توصیه می‌گردد. از اثرات نامطلوب دیگر ترکیبات وانادیم، واکنش با نسوزهای پایه کرم است. اسید وانادیک تشکیل شده به راحتی دانه‌های کرومیت را در خود حل می‌کند. البته امروزه استفاده از نسوزهای پایه کرم‌دار در

پس از فراوری، مقادیری CaO و SiO_2 دارد که هنگام پخت آجر به دی کلسیم سیلیکات تبدیل می‌گردد و این ماده به عنوان پیوند بین ذرات MgO قرار می‌گیرد، بدیهی است که با انهدام این پیوند در اثر واکنش ذکر شده، بافت نسوز متلاشی می‌گردد ولی اگر ماده اولیه منیزیت از نوع تهیه شده از آب دریا باشد و به روش پیوند مستقیم^۱ تهیه گردد^۲ این نگرانی وجود ندارد. خوشبختانه امروزه بیشتر آجرهای منیزیتی که در لایه‌های فوقانی و سقف چکرها و دیوار ری جنراتورها بالاتر از سطح چکرها استفاده می‌شوند ماده اولیه آن‌ها منیزیت گرفته شده از آب دریا، و بصورت "Dead Burnt"^۳ است که تا دمای بالا پخته شده و در شرایط پیوند مستقیم نیز هستند. در این روش چون پخت در دمای خیلی بالا صورت می‌گیرد و ناخالصی در ماده اولیه وجود ندارد ذرات MgO با هم سینتر^۴ شده و بین آن‌ها پیوند دیگری وجود ندارد (به همین جهت به آن‌ها "پیوند مستقیم" گفته می‌شود). سیلیس در کوره‌های تولید سیلیکات سدیم که دارای سقف (هم کوره و هم ری جنراتور) منیزیتی است به علت بالا بودن قلیایی با MgO موجود در آجر در مجاور قلیایی ترکیب شده و ماده فورستریت^۵ به فرمول $SiO_2 \cdot 2MgO$ تشکیل می‌دهد، این فاز به صورت یک قشر با ضخامت نسبتاً چشمگیر بر سطح آجر منیزیتی می‌نشیند. چون ضریب انبساط آن از آجر منیزیتی کمتر است بنابراین در زمان انبساط آجر منیزیتی نمی‌تواند با آن همراهی کند و جلوی انبساط آجر را می‌گیرد بنابراین در آجر منیزیتی انقباض و در سطح لایه فورستریتی انبساط حاصل می‌شود و سطح آجر ترک‌های مشهودی می‌خورد، این پدیده در کوره‌های ذوب سیلیکات سدیم به خوبی مشهود است. پدیده مزبور به انفجار فورستریت موسوم است و در کوره‌های تولید شیشه سودالایم چندان مورد توجه نیست. البته ذکر این نکته ضروری است که مساله گرفتگی شبکه با پودر سیلیس از واکنش‌های سیلیس مهم‌تر است.

آهک: اگر آهک ریزدانه در بیج زیاد باشد در چکرها پراکنده شده و به همراه سیلیس کری اور و MgO موجود در آجرهای منیزیتی تولید مونت سیلیت^۶ ($MgO \cdot CaO \cdot SiO_2$) با نقطه ذوب حدود

1. Direct Bond

۲. آجر منیزیتی تهیه شده از آب دریا به روش پیوند مستقیم و Dead burnt، بهترین نوع نسوز منیزیتی است.

۳. فاقد میل ترکیبی

4. Sintering

5. Forstrite

6. Monticellite

آجرهای پایه کرم وجود داشته باشند، ضایعات آن‌ها در طولانی مدت برای محیط زیست مساله‌ساز است. سولفات سدیم در لایه‌های میانی چکرها مایع می‌شود. این مایع دارای کشش سطحی کم و ضریب انبساط بیشتر از نسوز است به همین جهت به راحتی در تخلخل آجر نفوذ کرده و بر اثر گرم و سرد شدن متوالی بافت آجر را دچار ترک‌های ریز می‌کند و در این حالت آجر ترد و شکننده شده و استحکام خمشی آن کاهش می‌یابد. یکی از ویژگی‌های آجر مناسب برای این ناحیه (ناحیه سولفات یا لایه‌های میانی چکرها) داشتن استحکام خمشی گرم و سرد بالا است (نسوز AZS در چکرهای صلیبی و زیرکن منیزیت در چکرهای دودکشی).

۳- انتخاب نسوز مناسب

یکی از مشتقات مواد سرامیکی، دیرگدازها هستند. دیرگداز به طور عام به ماده‌ای گفته می‌شود که در برابر اثرات خورنده جامدات، مایعات و گازها در دمای بالا، مقاومت خوبی از خود نشان می‌دهد [۳ و ۸]. برای انتخاب یک نسوز مناسب در بخش‌های مختلف کوره نخست بایستی اطلاعات کاملی از نوع آن نسوز در دست باشد و سپس اثرات تخریبی عوامل سوء بر روی این نسوز می‌بایست شناخته شده باشد. انتخاب یک نسوز مناسب برای یک ناحیه از کوره در حقیقت مانند انتخاب یک شخص برای یک شغل خاص است، بدان معنا که ممکن است ویژگی‌ها و استعدادها یک فرد برای یک شغل معین، مناسب، ولی برای شغل دیگر مناسب نباشد و این قدرت تشخیص مدیریتی است که قادر است فرد مناسب را انتخاب کند. در مورد آجر نسوز نیز بایستی هم ویژگی‌های آجر مورد نظر و هم ویژگی‌های محلی که این آجر بایستی در آنجا نصب شود به طور کامل از نظر فرد انتخاب کننده مشخص باشد. با توجه به موارد ذکر شده ابتدا نسوزهای مناسب (با توجه به آخرین دستاوردهای پژوهشی روز) برای نقاط حساس و بحرانی کوره در ادامه معرفی شده‌اند.

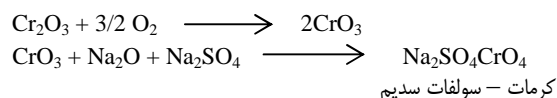
۳-۱ ساید بلاک‌ها: ساید بلاک‌ها آجرهای تشکیل دهنده دیواره‌های اطراف کوره هستند [۹]. ناحیه بحرانی در این بخش خط ذوب است. نسوز مناسب برای این محل در کوره‌های تولید شیشه با ترکیب سودالایم، نسوز ذوب و ریخته‌گری AZS با درصد ZrO_2 حدود ۳۶/۵٪ و ۴۱٪ است.

ری جنراتورها به علت اثرات نامطلوب زیست محیطی تقریباً منسوخ شده است.

قلیایی‌ها: قلیایی‌ها، هم به صورت تبخیر از سطح مذاب و هم به صورت ذرات پراکنده از بیج وارد چکرها می‌شوند (از عوامل مهم تشدید تبخیر قلیایی از سطح مذاب وجود بخار آب در اتمسفر کوره است). این ماده با Na_2O در سطح مذاب ترکیب شده و $NaOH$ می‌سازد چون فشار بخار $NaOH$ از Na_2O بیشتر است بنابراین سریع‌تر و بیشتر خارج می‌گردد. البته مقدار بخار آب در گازهای حاصل از احتراق کوره‌های گازسوز حدود ۱۸ درصد و در نفت‌سوز، حدود ۱۲ درصد است، به ویژه باید تبخیر در کوره‌های گازسوز بیشتر باشد حال آن که چنین نیست زیرا وجود گوگرد در نفت بر این امر غلبه می‌کند حال باید دید گاز طبیعی اگر حاوی مقادیر بالایی گوگرد باشد (نظیر گازهای طبیعی مصرفی در ایران) چه مشکلاتی ایجاد خواهد نمود. قلیایی‌ها در واکنش با چکرها اثرات نامطلوب زیر را دارند:

- اگر در تماس با نسوزهای آلومینوسیلیکات در بالای دمای $1000^{\circ}C$ قرار گیرند ماده‌ای به نام نفلین $(Na_2Al_2Si_2O_8)$ یا $(K_2Al_2Si_2O_8)$ تشکیل می‌دهند. نفلین علاوه بر زودگداز بودن ضریب انبساط حرارتی بالایی دارد (زیادتر از نسوز) بنابراین پس از نفوذ قلیایی‌ها به داخل بافت نسوز و تشکیل نفلین در داخل آن‌ها بر اثر انبساط، آجر را تکه تکه می‌کند چون این واکنش از سطوح نزدیک به سطح خارجی نسوز شروع می‌شود سطح خارجی آجر در اثر این پدیده پوسته پوسته می‌گردد که به این پدیده انفجار نفلین می‌گویند. در لایه‌های پایینی چکرها که دما بین $800^{\circ}C$ تا $1000^{\circ}C$ است این واکنش مخرب نیست.

- اگر قلیایی‌ها در دمای بالاتر از $1000^{\circ}C$ در اتمسفر اکسیدی کوره (در کوره‌های ذوب شیشه به علت هوای اضافی در گازهای احتراق، اتمسفر کوره معمولاً اکسیدان است) زیاد باشند در صورت وجود نسوزهای پایه کرم، واکنش زیر نیز صورت می‌گیرد:



این ماده سمی است و در آب محلول است بنابراین اگر در چکرها،

۲-۳ سقف کوره: امروزه دمای اکثر سقف‌های تولید شیشه‌های سودالایم به خصوص شیشه‌های شناور از 1550°C بالاتر است بنابراین استفاده از آجرهای سیلیسی معمولی برای این منظور مناسب نیست و بهتر است از آجرهای سیلیسی ممتاز^۱ برای این منظور استفاده شود. آجر سیلیسی ممتاز معمولاً به نوعی آجر سیلیسی گفته می‌شود که درصد SiO_2 آن بالاتر از $96/5$ درصد، قلیایی آن زیر $0/1$ درصد، Fe_2O_3 آن زیر $0/6$ و تخلخل باز آن زیر 19 درصد باشد. در ضمن این آجرها باید دارای استحکام فشاری گرم^۲ بالا و تغییرات خطی در حرارت دادن مجدد جزئی باشند تا دوام و قوام سقف سیلیسی حفظ گردد. آجرهای نسوز هنگامی که در معرض گرما قرار می‌گیرند، گرایش به منقبض شدن دارند. استحکام فشاری گرم (RUL) عبارت است از مقاومت مواد نسوز به تغییر شکل در حرارت بالا و زمانی که زیر بار قرار دارند [۸ و ۱۰].^۳

در سال‌های اخیر تمهیداتی در جهت بهینه‌سازی نسوزهای سیلیسی سقف کوره‌های سودالایم انجام شده است که یک نمونه آن ابداع نسوزهای سیلیسی کندویی^۳ در دهه ۸۰ توسط کمپانی دیدی-یر^۴ آلمان (که امروزه جز مجموعه آر-اچ-آی^۵ است) بود، این ابداع بیشتر از آن که در جهت افزایش عمر سقف باشد در جهت صرفه‌جویی در مصرف سوخت بوده است. طبق آزمایشات انجام شده در آن زمان 50 درصد از انرژی حرارتی ناشی از شعله مشعل به سطح مذاب و 50 درصد آن به سقف برخورد می‌کند، از 50 درصدی که به سقف برخورد می‌کند حدود 5 درصد آن از طریق ضخامت سقف تلف شده و 20 درصد آن به طریق انعکاس از سقف (که به مثابه یک آینه مقرر است) به سطح مذاب برمی‌گردد و 75 درصد آن به صورت تابش^۶ سقف به سطح مذاب برخورد می‌کند. آن چه که بایستی بدان توجه شود این است که تابش از شعله (گازهای حاصل از احتراق) به سقف در نوار باریکی از طول موج اجزای موجود در گاز (CO_2 و بخار آب) انجام می‌شود بخشی از اشعه که از سقف منعکس می‌شود چون دارای طول موجی در محدوده ذکر شده است تماماً توسط شعله جذب شده و از طریق دودکش هدر رفته و به سطح مذاب نمی‌رسد در عوض چکرها را بیش از حد گرم^۷

می‌کند. در استفاده از آجرهای سیلیسی لانه زنبوری حفره‌های داخل سقف طبق اظهار کارشناسان شرکت سازنده نسوز، به عنوان یک جسم کدر عمل می‌کند و بخش بزرگ‌تری از اشعه را جذب و مجدداً تابش می‌نماید (نه انعکاس)، در این حالت فقط 5 درصد از سقف منعکس می‌گردد و از بخش تابش شده از سقف، حدود 90 درصد (یعنی 15 درصد بیشتر از حالت قبل) به صورت تابش به مذاب می‌رسد و بدین ترتیب مقدار انرژی مفید برای مذاب در این حالت بیشتر است. در آن زمان گفته شده بود که استفاده از این آجرها باعث می‌گردد که انرژی حرارتی بیشتری صرف افزایش دمای مذاب شود، دمای سقف و بریست وال^۸ در مقایسه با استفاده از نسوزهای سیلیسی معمولی کمتر می‌شود و مصرف انرژی 5 تا 8 درصد کاهش می‌یابد. با این که در آن زمان گفته شده بود که حفره‌هایی که به شکل یک منشور واگرا در سقف می‌باشند قادر هستند در انحنای خود مقادیر زیادی پرتوهای حرارتی را محبوس نموده و ایجاد یک ناحیه متلاطم در جلوی سقف نموده و به عنوان یک سپر حرارتی سقف را از تهاجم بخارهای قلیایی حفظ می‌کند ولی در عمل و پس از چند آزمایش این آجرها در کوره‌های واقعی سقف‌ها دوام مورد انتظار را نداشته و زود به زود سوراخ می‌شدند بنابراین این آجرها عملاً کارایی مورد ادعای شرکت سازنده را نداشتند. البته این مساله هنوز مورد بحث و ادعای شرکت سازنده می‌باشد. براساس یک اظهارنظر، تجمع و محبوس شدن قلیایی‌ها در حفره‌های سقف و کندانس شدن^۹ آن‌ها میزان خوردگی را در سقف افزایش می‌داده است.

۳-۳ گلوگاه: عامل اصلی محدود کننده عمر گلوگاه‌ها خوردگی حباب یا خوردگی به سمت بالا (UWD) است. امروزه پیشنهاد می‌گردد که سقف گلوگاه‌ها که عمل خوردگی حباب در آنجا اتفاق می‌افتد رو به سمت ریفاینر^{۱۰} دارای شیب رو به بالا باشد که حباب به سقف برخورد نکرده و همراه با جریان مذاب وارد ریفاینر شود. بهترین گزینه پیشنهادی برای نسوز سقف گلوگاه در کوره‌های تولید بطری، آجرهای پایه کرم با 95 درصد اکسیدکرم و ساخته شده به روش ایزواستاتیک پرس است. این نسوزها دارای فشردگی بسیار زیاد (بیشتر از AZS) است و مقاومت بسیار بالایی در مقابل خوردگی مذاب دارند. در کوره‌های تولید بلور استفاده از این نسوزها

1. Super-Duty
2. Refractoriness Under Load (RUL)
3. Honey-Comb
4. Didier
5. RHI
6. Emission
7. Overheat

۸. دیواره سینه کش: دیوار جانبی کوره محصور بین مذاب و طاق کوره بدون احتساب قسمت‌های انتهایی

9. Condensate
10. Refiner

استفاده شود نوع زاک با حدود ۵۳ درصد Al_2O_3 و ۳۱ درصد ZrO_2 و ۱۵ درصد SiO_2 ، و اگر از نوع دودکشی استفاده شود از آجرهای زیرکونیا-منیزیا با ZrO_2 حدود ۱۳ تا ۱۶ درصد و MgO حدود ۷۴ تا ۷۸ درصد بهتر است استفاده شود. آجرهای منیزیا-زیرکونیا دارای دو فاز ZrO_2 (تثبیت شده در فرم مکعبی) و فورستریت ($SiO_2, 2MgO$) است. این دو فاز به عنوان یک محافظ، ذرات پریکلاس (MgO) را در بر گرفته و آن‌ها را از تهاجم SO_3 و وانادیم (موجود در مازوت) حفظ می‌کند. البته اگر کوره نفت‌سوز باشد بهتر است از آجرهای چکر نوع صلیبی استفاده شود. ذکر این نکته ضروری است که ممکن است در بعضی کاربردها متناسب با شرایط راهبری، اندکی تفاوت موجود باشد مثلاً در کوره‌های تولید شیشه شناور که سایدهورت^۲ هستند و بین ۶ تا ۸ پورت در هر طرف دارند اگر آجر چینی چکر از نوع صلیبی باشد در سه پورت اول و در لایه‌های بالایی از نسوز بتآلومینا و در پورت‌های بعدی در این ردیف‌ها از نسوز ذوب و ریخته‌گری زاک با حدود ۵۳ درصد Al_2O_3 و ۳۱ درصد ZrO_2 و ۱۵ درصد SiO_2 استفاده می‌شود و گاهی در کوره‌هایی که در هر طرف تعداد ۸ پورت قرار گرفته در دو پورت آخری که تقریباً میزان فرابری صفر است از آجر زاک اندکی ضعیف‌تر مثلاً با ۵۷ درصد Al_2O_3 و حدود ۱۵ درصد ZrO_2 و حدود ۲۳ درصد SiO_2 استفاده می‌شود.

ب) لایه‌های میانی: در این لایه اگر آجر نوع صلیبی باشد، آجر زاک با همان مشخصات ذکر شده در بند الف پیشنهاد می‌گردد (البته در این نوع زاک مقادیری MgO موجود است که جزیی تفاوت با سایر زاک‌ها دارد) این نسوزها دارای تخلخل باز نیستند بنابراین سولفات‌ها نمی‌توانند در آن‌ها نفوذ کنند، همچنین در صورت ترکیب با قلیایی‌ها و تولید نفلین، این ماده نمی‌تواند در عمق آجر نفوذ کند و بالاخره به علت داشتن استحکام خمشی بسیار بالا (در مقایسه با نسوزهای پخته شده) سولفات، اثر تر دشوندگی روی آن ندارد. در صورتی که از آجرهای دودکشی استفاده شود در این لایه‌ها استفاده از نسوز زیرکن منیزیت با ۱۳ درصد ZrO_2 و ۷۴ درصد MgO گزینه مناسبی است. یکی از گزینه‌های مناسب دیگر برای این ناحیه نسوزهای اسپنیل است ($MgO - Al_2O_3$)، که از آجرهای زیرکن-منیزیت مقاوم‌تر، ولی بسیار گران است.

پ) لایه‌های پایینی: اگر آجر چکر از نوع صلیبی باشد، نوع زاک با

توصیه نمی‌شود زیرا ممکن است بر اثر حل مقادیر جزیی اکسید کرم در مذاب ایجاد رنگ نمایند. در این کوره‌ها بهترین گزینه استفاده از AZS با ۴۱ درصد ZrO_2 است، برخی سازندگان نسوز ادعا می‌کنند که بهترین گزینه برای این منظور نسوز ذوب و ریخته‌گری AZS مسلح با فویل مولیبدن است. ولی اگر در این کوره‌ها مقادیر زیادی آرسنیک که عموماً به عنوان یکی از عوامل رنگبر و یا عامل تصفیه کننده استفاده می‌گردد مصرف شود این نوع نسوز در برخی مواقع پاسخ مناسبی نمی‌دهد زیرا آرسنیک و مولیبدن یک آلیاژ بوتکتیک^۱ می‌سازد که نقطه ذوب آن پایین است و به سرعت فویل مولیبدن را ذوب می‌کند. به همین جهت است که امروزه توصیه می‌شود در کوره‌هایی که از سیستم الکتروبوستینگ با الکتروود مولیبدن استفاده می‌شود آرسنیک از چرخه فرایند حذف گردد.

۳-۴ سقف ری جنراتورها: هنوز بهترین گزینه برای سقف ری جنراتورها آجرهای منیزیتی کم آهن (زیر ۰/۵ درصد) که از نوع پیوند مستقیم است پیشنهاد می‌گردد. یک گزینه دیگر نیز در کوره‌های سودالایم که درصد قلیایی در آن‌ها زیر ۱۴ درصد است آجر فیوزمولایت با تخلخل پایین است ولی کاربرد آن عمومیت پیدا نکرده است و هنوز این مساله مورد بحث است.

۳-۵ چکرها

الف) لایه‌های بالایی: بهترین ترکیب آجرچینی از نظر دوام در چکرهای ری جنراتورهای کوره‌های ذوب شیشه انواع صلیبی و دودکشی است و در مورد آن که کدام یک از این دو نوع بر دیگری برتری دارند مباحث مختلفی مطرح می‌گردد که در حوصله این مبحث نمی‌گنجد. برای ۴ الی ۵ ردیف بالا اگر چکرها از نوع صلیبی ذوب و ریخته‌گری باشد نوع بتآلومینا با حدود ۷/۵ درصد MgO ، ۴/۵ درصد Na_2O و ۸۷/۵ درصد Al_2O_3 مناسب است، این نسوز دارای مقاومت بالا در برابر شوک حرارتی است و چون فاز شیشه آن بسیار جزیی (زیر یک درصد) است بنابراین اثرات مخرب $NaOH/Na_2SO_4$ موجود در گازهای خروجی نمی‌تواند بر آن تاثیر بگذارد. اگر برای چکرچینی از آجرهای دودکشی استفاده شود، بهترین گزینه برای این قسمت آجرهای منیزیتی پیوند مستقیم است. برای حدود ۶ تا ۷ ردیف پایین‌تر اگر از آجرهای صلیبی

2. Side-Port

۱. آمیزه زودگداز

قادر نیست در ابتدا که ضخامت آجر زیاد است این وظیفه را انجام دهد و به همین جهت است که بین ۶ ماه تا یک سال اول کارکرد کوره علیرغم وجود این هوای خنک‌کن، خوردگی در خط ذوب شدید است. بنابراین در ۶ ماه اول شروع به کار کوره عملاً وجود هوای خنک‌کن صرفاً مصرف انرژی خواهد بود. اما نکته دیگر که بایستی در این امر به آن توجه گردد آن است که چون ابزار اندازه‌گیری ضخامت آجر در ایران در دست نیست بنابراین نمی‌توان به طور دقیق لحظه نیاز به سیستم خنک‌کننده را پیش‌بینی کرد، پس اگر از ابتدا سیستم خنک‌کن به کار برده شود به جز اتلاف انرژی مشکل دیگری ایجاد نمی‌گردد و برای قرار گرفتن در حاشیه ایمنی بهتر است از همان ابتدا این هوا به کار گرفته شود. سر لوله‌های خنک‌کن بایستی مجهز به شیپوری باشند و شیپوری‌های هوا کاملاً به پشت ساییدلاک‌ها بچسبند. شدت جریان مناسب هوا برای خنک‌کاری پشت ساییدلاک‌ها در ناحیه خط ذوب ۱/۲ مترمکعب بر ثانیه به ازای یک متر طول ساییدلاک است و فشار بهتر است حدود ۱۷۵۰ پاسکال یا ۱۷۵ میلی‌متر آب باشد. ایزولاسیون پشت ساییدلاک‌ها بایستی طوری باشد که درزهای عمودی ایزوله نشوند، هنگامی که در ناحیه درزها سرخی زیادی ملاحظه شود (در اواخر عمر کوره) به طوری که با هوای خنک‌کن سیاه نشوند، یک ردیف ایزوله پشت ساییدلاک‌ها باید برداشته شود. در عملیات دال‌گذاری از دال‌هایی به ضخامت ۷/۵ تا ۱۰ سانتیمتر می‌توان استفاده کرد. در خنک‌کاری پس از دال‌گذاری علاوه بر سطح بیرونی آجر دال در ناحیه خط ذوب، فصل مشترک بین آجر دال و ساییدلاک نیز بایستی با یک لوله خرطومی که در سر آن شیپوری نصب شده است خنک‌کاری گردد. بهتر است ابعاد نازل سر شیپوری طوری انتخاب شوند که سرعت هوای خنک‌کن حدود ۳۰ متر بر ثانیه بوده و زاویه این شیپوری با خط قائم ۱۵ تا ۳۰ درجه باشد (معمولاً شکاف سر نازل ۱۰ تا ۲۵ میلی‌متر است). زمان مناسب برای دال‌گذاری وقتی است که سرخی پشت آجر علیرغم استفاده از هوای خنک‌کن از بین نرود. اگر قبل از اقدام به عملیات دال‌گذاری، شیشه از ناحیه‌ای بیرون زد، با یک جریان هوای سرد و در صورت عدم امکان با جریان ضعیف آب سرد به صورتی که با فشار پاشیده نشود صرفاً به صورت یک جریان آرام با محل نشستی برخورد کند. ابتدا جریان شیشه رو به خارج از کوره بایستی متوقف گردد و سپس با

ویژگی‌های ذکر شده در بند (الف) و (ب) گزینه مناسبی است و اگر دودکشی باشد نسوز مناسب زیرکن - منیزیت با ویژگی‌های ذکر شده در بند (ب) است.

۳-۶ کف کوره: برای دوام کف کوره‌ها یک ترکیب آجرچینی مناسب کف به شرح زیر است:

- دو ردیف زیرین نوع ایزوله شاموتی عموماً به ضخامت هر لایه ۱۰ سانتی‌متر

- یک لایه آجر شاموتی با حداقل ۴۵ درصد Al_2O_3 به ضخامت حدود ۲۰ سانتی‌متر

- یک لایه زیرکن به ضخامت حدود ۷/۵ سانتی‌متر

- یک لایه جرم کوئینتی زیرکن به ضخامت ۳ تا ۴ سانتی‌متر

- یک ردیف پیوینگ^۱ زاک با حدود ۳۶ درصد زیرکونیا به ضخامت ۷/۵ تا ۱۰ سانتی‌متر

۴- عملیات نگهداری و تعمیر

۴-۱ ساییدلاک‌ها

یک مساله به اشتباه، به صورت یک اصل مهم در نگهداری ساییدلاک‌ها در صنعت شیشه‌سازی جاافتاده و آن خنک‌کاری پشت ساییدلاک‌ها در ناحیه خط ذوب از ابتدای راه‌اندازی کوره است. قبل از بحث در این مورد بهتر است به فلسفه اصلی خنک‌کاری ناحیه فلاکس لاین پرداخته شود. در بحث نظری مربوط به این قضیه گفته می‌شود که یکی از دلایل خوردگی شدید در ناحیه خط ذوب وجود سه فاز هوا، مذاب و نسوز است و شیب کشش سطحی باعث می‌گردد که مذاب غنی از برخی از اجزای نسوز به سرعت از فصل مشترک دور شده و مذاب تازه جای آن را بگیرد، در اینجا اگر ضخامت لایه ساکن مرزی زیاد باشد این جابه‌جایی چون از طریق دیفوزیون صورت می‌گیرد بنابراین باید از ضخامت لایه ساکن عبور کند، در ضمن جریانات جابه‌جایی در داخل مخزن نیز هرچه ضخامت لایه ساکن بیشتر باشد کمتر قادر هستند مذاب غنی از اجزای نسوز را از فصل مشترک دور نموده و لایه ساکن را نازک کنند، خنک‌کاری پشت ساییدلاک با هوا در ناحیه خط ذوب باعث می‌گردد که گرانیوی این لایه زیاد شده و ضخامت آن افزایش یابد. ولی نکته‌ای که قابل توجه است آن است که این هوای خنک‌کن

1. Paving

برق و در نتیجه قطع فن خنک‌کن گلوگاه، ترک‌های ریز موجود بر پشت آجرها در نواحی مختلف کوره بزرگ‌تر و عمیق‌تر می‌شوند. در زمان وصل مجدد برق (به خصوص اگر مدت زمان قطع برق بیش از ۵ دقیقه باشد) فن خنک‌کن روشن شده و با همان شدت قبلی بر پشت آجری که پیش از آن به علت قطع شدن هوای خنک‌کن داغ شده است هوای سرد می‌دمد. بر اثر این پدیده ترک‌ها باز هم رشد می‌کنند، بنابراین قطع طولانی مدت برق دو اثر منفی به صورت زیر بر نسوزهای گلوگاه به جای می‌گذارد:

- در اثر قطع این هوا تنش کششی بر سطح خارجی آجرها ایجاد شده و ترک‌ها رشد می‌کنند.
- بر اثر دمش مجدد هوای سرد و ایجاد شوک حرارتی نسبتاً چشمگیر، دوباره ترک‌های جدیدی ایجاد شده و ترک‌های قبلی نیز بزرگ‌تر و عمیق‌تر خواهند شد.

یک توصیه آن است که اگر به علتی برق کوره مدت زمانی بیش از ۵ دقیقه ناگزیر قطع شد بهتر است فن خنک‌کن گلوگاه مجهز به دمپر باشد تا هنگام وصل مجدد برق این دمپر ابتدا بسته شده و سپس به تدریج باز شود.

۳-۴ ری جنراتورها

در ری جنراتورها روزنه چکرها مناطق بحرانی هستند و در ناحیه میانی چکرها سولفات به همراه سایر مواد جامد در کری اور، روزنه چکرها را مسدود می‌کند، برای این امر بهتر است از یک مشعل Hot-Work¹ استفاده شود و با شناسایی روزنه‌های مسدود شده (خانه‌هایی که قبلاً روشن بودند تصویر آن‌ها در کف فلوی زیر رایدن آرچ‌ها تیره می‌شوند) هوای گرم ناشی از مشعل به داخل روزنه مسدود شده دمیده شود و این امر باعث می‌گردد که سولفات منجمد شده ذوب و در پیچه باز شود. بهتر آن است که از زمان راه اندازی کوره هر یک ماه یک مرتبه خانه‌های روشن در کف فلوی رایدن آرچ‌ها بازدید شوند، اگر حالت منظم و گوشه‌دار آن‌ها (در چکرهای صلیبی چهارگوش و در چکرهای دودکشی شش گوش) نامنظم شده باشند حکایت از آن دارد که سولفات به بدنه چسبیده و گرفتگی شروع شده است، در این حالت، عملیات Thermal-Cleaning² یا Burn-Out (بازسازی مجرای پیش گرم کن)

1. Hot-Work Burner
2. or Thermal-Washing

دقت تمام شیشه‌هایی که در پشت سطح بیرونی سایدبلاک به علت نشت مذاب چسبیده‌اند به دقت تراشیده شود به طوری که تقریباً هیچ شیشه‌ای باقی نماند سپس در صورت امکان پشت سایدبلاک (ناحیه‌ای که قبلاً شیشه چسبیده بود) با یک سنگ سخت، ساب زده شود به طوری که وقتی آجر دال به پشت آن چسبانیده می‌شود هیچ درزی بین آن‌ها باقی نماند. در ادامه توسط تسمه یا نبشی که در پشت دال قرار داده شده و به اسکلت فلزی جوش داده می‌شود آجر دال کاملاً به سایدبلاک چسبانده و محکم شود (دقت گردد آجر دال تا حد ممکن کاملاً به پشت سایدبلاک بچسبد، هرگونه فاصله بین این دو، امکان ورود مذاب به داخل درز و پیشرفت خوردگی را محتمل‌تر می‌سازد).

۲-۴ گلوگاه

عملیات نگهداری و تعمیر گلوگاه به مراتب مشکل‌تر از سایدبلاک است زیرا راه دسترسی به آنجا مشکل است. اگر برای سقف گلوگاه از آجر ۹۵ درصد اکسیدکرم ساخته شده به روش ایزواستاتیک پرس استفاده شده باشد، ناپیستی هوای خنک‌کن مستقیماً به پشت آن‌ها دمیده شود زیرا این آجرها بسیار فشرده هستند و بدین جهت ترد و شکننده می‌باشند و در تماس مستقیم با هوای سرد ترک بر می‌دارند. بنابراین بر پشت آن‌ها یک ردیف آجر دال از نوع زاک بایستی نصب شود و هوا به پشت آجرهای دال نوع زاک دمیده شود. هوای خنک‌کن مناسب برای گلوگاه‌ها بین ۵ تا ۱۰ متر مکعب در ثانیه و با فشار ۲۵۰۰ پاسکال (۲۵۰ میلی‌متر آب) است. بادبزن خنک‌کننده گلوگاه هیچگاه نباید از ۵ دقیقه بیشتر خاموش باشد زیرا در اثر قطع برق (اگر برق کل کوره قطع شود) درجه حرارت کوره حداقل ۲۰۰ درجه سلسیوس افت می‌کند (عدد ذکر شده مربوط به قطع برق در مدت ۵ تا ۱۰ دقیقه است) که این امر برای گلوگاه کوره خطرناک است، زیرا سطح داخلی نسوز گلوگاه که در تماس با مذاب است بر اثر کاهش دما (ناشی از سردتر شدن مذاب) اندکی منقبض می‌گردد و برعکس سطح بیرونی نسوز گلوگاه به علت قطع برق و نیز قطع هوای خنک‌کن، گرم شده و منبسط می‌گردد. بنابراین در سطح بیرونی این نسوز تنش‌های کششی شدیدی به وجود می‌آید که باعث ایجاد ترک‌های جدید و یا احیاناً رشد ترک‌های موجود می‌گردد و به همین دلیل است که در زمان قطع

کوره ممکن است هوا کارساز نباشد بنابراین از اسپری آب سرد در این نواحی می‌توان استفاده کرد. از نکات مهم، استفاده از خرده شیشه‌های از قطعات فلزی است زیرا افتادن این قطعات در کف باعث بروز خوردگی خواهد شد (پدیده خوردگی رو به پایین^۲).

۴-۵ سقف کوره

پس از اتمام عملیات گرم کردن ممکن است درزهای انبساط بین دو قسمت^۳ سقف کاملاً بسته نشوند در این حالت، متناسب با فاصله باقیمانده قطعاتی از آجرهای زیرکن مولایت به شکل هرم ناقص بایستی بریده شوند و در این فواصل گذاشته شده و بر روی آن ملات فیوزسیلیکا یا زیرکن پیچ ریخته شود. برای ترمیم سوراخ‌های ایجاد شده در سقف در اواسط و اواخر عمر کوره از ملات‌های هواگیر (زودگیر)^۴ و قطعات آجر فیوزسیلیس بایستی استفاده گردد.

۴-۶ داگ - هاوس^۵

داگ-هاوس کوره نیز یکی از نواحی حساس است که در آنجا بیج موجود بر سطح مذاب به علت آن که خاصیت سایندگی مکانیکی زیادی دارد^۶، گوشه‌های داگ-هاوس را به طور شدید فرسوده می‌کند زیرا بیج حین ورود به کوره به خصوص در کوره‌های پشت‌گذر^۷ که داگ-هاوس در بخش جانبی تانک ذوب قرار دارد با یک چرخش ۹۰ درجه وارد تانک شده و مدام به گوشه‌های داگ-هاوس ساییده می‌شود. برای این امر بایستی از بارریزهای مناسب استفاده شود تا بیج حین ورود به مخزن کمترین تماس را با گوشه‌ها داشته باشد.

۴-۷ استفاده از مشعل مناسب

از نکات مهم دیگر، استفاده از مشعل مناسب، زاویه مناسب مشعل‌ها و اختلاط بهینه مخلوط گاز و هوا است، بهترین نسبت حجمی برای

۳. Downward Drilling (قطعات فلزی و به خصوص آهنی همواره مقادیری کربن دارند، وقتی در مذاب رها شده و به کف می‌رسند اکسیژن موجود در مذاب با کربن ترکیب شده و حباب‌های گاز CO تولید می‌کنند، این حباب‌ها چون چسبیده به قطعات فلزی هستند نمی‌توانند روبه بالا حرکت کنند و به صورت مستقر در سر قطعه فلزی با همان مکانیزم خوردگی حباب آجر را رو به پایین سوراخ می‌کنند.)

3. Section
4. Air Set
5. Dog house
6. Erosion
7. End Port

در مراحل زیر بایستی در زمان‌های ادواری مناسب صورت گیرد:
- ابتدا به مدت ۴۸ ساعت در ری‌جنراتوری که روزنه‌های آن در حال گرفته شدن است زمان سیکل به ۳۰ دقیقه افزایش داده شده (وقتی دود گرم از این چکرها عبور می‌کند) و دمای کوره حتی‌المقدور بالا برده شود این امر باعث می‌گردد که درجه حرارت منطقه‌ای که سولفات در آنجا منجمد شده به بالای ۱۱۰۰ °C برسد و سولفات ذوب شده و پایین بریزد، وقتی زمان سیکل ۳۰ دقیقه‌ای این بخش تمام شد و سیکل عوض شد در سیکل بعدی زمان سیکل به حالت عادی برگردد و دوباره این عمل تکرار گردد.

- اگر با انجام عمل فوق مجاری باز نشد، از مشعل Hot-Work و در صورت عدم دسترسی از یک مشعل سرکچ شعله‌ای که با هوای کمپرسور می‌سوزد می‌توان استفاده نمود، دقت گردد که در این عملیات شعله مشعل (اگر از مشعل شعله‌ای استفاده می‌شود) تا حد امکان در راستای محور فلوی عمودی چکرها باشد و به بدنه آجری به خصوص رایدنر آچرها برخورد نکند.

لازم به ذکر است که تحت هیچ شرایطی نباید مجاری فلوها بطور کامل بسته شوند زیرا باز کردن آن‌ها مشکل است. در ضمن هرچه سرعت عبور گاز از داخل فلوها بیشتر باشد (دریچه تنگ‌تر باشد) میزان نشست سولفات بیشتر خواهد شد، به همین دلیل است که توصیه می‌گردد به محض مشاهده تنگی در مجاری اقدام گردد (عملیات پاکسازی حرارتی^۱).

۴-۴ کف کوره‌ها

کف کوره از نواحی مهم و گلوگاه‌های قابل توجه است زیرا به سختی می‌توان ریزش مذاب از کف را مهار نمود. لازم به ذکر است که نیروی هیدرواستاتیک ناشی از وزن مذاب بر کف کوره باعث می‌گردد که ریزش مذاب از کف به مراتب از ساییدلاک‌ها شدیدتر و غیرقابل کنترل‌تر باشد. بنابراین بایستی به طور مستمر از این ناحیه بازدید نمود و به مجرد مشاهده سرخی بیش از حد در درزها، از لوله‌های افقی که بر روی آن سوراخ‌هایی به فواصل ۱۵ تا ۲۰ سانتی‌متر و به قطر ۲ الی ۴ میلیمتر ایجاد شده استفاده شود. این لوله‌ها به صورت افقی به درزها چسبانیده شده و از داخل آن هوا با فشار زیاد (ترجیحاً هوای کمپرسور) عبور داده شود. در اواخر عمر

1. or Thermal Cleaning

مراجع

- [1] مارقوسیان، و.، «شیشه: ساختار، خواص و کاربرد»، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، چاپ دوم، (۱۳۸۶).
- [2] Arvanitoyannis, I. S., "Waste Management for the Food Industries", Elsevier academic press, 1st ed., United States of America, Part 6 (15), pp. 941-980, (2008).
- [3] امامی، ا.، «دیرگدازهای مصرفی در صنایع شیشه»، نشر شرکت سهامی شیشه قزوین (عام)، قزوین، چاپ اول، (۱۳۷۱).
- [4] Sardeshpande, V., Gaitonde, U.N., Banerjee, R., "Model based energy benchmarking for glass furnace", Energy Conversion and Management, Vol. 48, Issue 10, pp. 2718-2738, (2007).
- [5] Gottardi, V., "Refractories for the glass industry", Journal of Non-Crystalline Solids, Vol. 80, Issue 1-3, pp. 93-102, (1986).
- [6] تولی، ف. و.، (Tooley, F. V.)، «شالوده صنعت شیشه»، برگردان گروه مترجمین، نشر شرکت سهامی شیشه قزوین (عام)، قزوین، چاپ اول، (۱۳۷۲).
- [7] Sardeshpande, V., Anthony, R., Gaitonde, U.N., Banerjee, R., "Performance analysis for glass furnace regenerator", Applied Energy, Vol. 88, Issue 12, pp. 4451-4458, (2011).
- [8] Alnawafleh, M. A., "Mechanical and physical properties of Silica bricks produces from local materials", Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 3(2), pp. 418-423, (2009).
- [9] کمیسیون استاندارد، «اصطلاحات و واژه‌های مورد استعمال در صنعت شیشه سازی»، موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، شماره استاندارد ۲۶۸۳، چاپ اول، (۱۳۶۹).
- [10] Fayyad, S. M., Al-Marahleh, Gh. S., Abu-Ein, S. Q., "Improvement of the refractoriness under load of fire-clay refractory bricks", Advances Theoretical and Applied Mechanics, Vol. 5, No. 4, pp. 161-172, (2012).

اختلاط گاز و هوا نسبت ۱۰ تا ۱۵ (نسبت هوا به گاز طبیعی) است. در کوره‌هایی که بلور تولید می‌کنند بایستی دقت گردد که مقدار CO در گاز خروجی زیاد نباشد زیرا باعث کدر شدن رنگ شیشه تولیدی خواهد شد. در ضمن میزان اکسیژن موجود در گازهای حاصل از احتراق بهتر است از ۷ درصد بیشتر نباشد که در این صورت حاکی از عدم تماس مناسب سوخت با هوا و اختلال در احتراق خواهد بود.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله به مسائل مربوط به کوره‌های ذوب شیشه پرداخته شد و سعی شد موارد موثر در عمر کوره‌ها به گونه‌ای کاربردی و با رویکردی علمی-تجربی بحث و بررسی شوند تا بتواند برای صنایع شیشه سازی کشور مفید واقع گردد. نکته‌ای که بایستی به آن توجه گردد آن است که ملاک عمر کوره زمان کارکرد آن نیست بلکه میزان کشش مذابی است که به ازای واحد سطح ذوب از کوره کشیده شده است. این عدد بین ۸،۰۰۰ تا ۱۰،۰۰۰ تن به ازای هر مترمربع است که هر لحظه با برآورد مقدار مذابی که از کوره کشیده شده است این عدد قابل محاسبه خواهد بود. امروزه در ایران به خاطر محدودیت‌هایی که در تهیه آجر نسوز و سایر تجهیزات وجود دارد، برای استفاده بهینه از کوره‌ها نخست بایستی از آجرهای نسوز مرغوب استفاده گردد و سپس تا جایی که امکان دارد زمان راهبری کوره افزایش داده شود. هرچند که این امر ممکن است با استانداردهای بین‌المللی همخوانی نداشته باشد.