



حباب‌زدایی از مذاب شیشه‌های سیلیکات سربی

رفیع‌علی رحیمی*، امیر حمیدی، مجتبی نقوی

پژوهشکده مواد، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۴۹۸-۳۱۴۸۵، کرج - ایران

چکیده: در عملیات ذوب شیشه‌ی سیلیکات سربی حاوی ۷۰٪ وزنی سرب اکسید، توزیع اندازه‌ی حباب، نحوه‌ی تشکیل و حذف آن در زمان و دماهای مختلف، مورد مطالعه قرار گرفت. تولید شیشه‌های سربی از طریق ذوب، فریت و آسیاب کردن پودر شیشه طی چندین مرحله انجام گرفت. نمونه‌های ۵۰ گرمی از پودر شیشه‌ی سیلیکات سربی، در درون بوتله‌های اکسید آلومینیمی در دماهای ۹۰۰، ۹۵۰، ۱۰۰۰، ۱۰۵۰ و ۱۱۰۰°C و در مدت زمان‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ دقیقه تحت عملیات حرارتی قرار گرفتند. به دلیل وجود هوا و حل شدن آن در درون مذاب و نیل به حالت فوق اشباع، حباب‌های گاز در درون مذاب تشکیل شدند. به دلیل اختلاف چگالی حباب‌های گاز با مذاب شیشه، حباب‌ها به بالای سطح مذاب نفوذ کرده و در آن‌جا با ترکیدن لایه‌ی شیشه‌ای حباب، از مذاب خارج شدند. چگالی بوتله‌های اکسید آلومینیمی و شیشه‌ی درون آن اندازه‌گیری و از آن حجم (سانتی‌متر مکعب) و اندازه‌ی متوسط حباب‌ها تعیین گردید. تصاویری از جدار جانبی شیشه‌ی درون بوتله، که نشان‌گر شیشه‌ی بدون حباب و لایه‌ی حبابی است، و هم‌چنین از سطح نمونه‌ها برای برآورد اندازه‌ی حباب‌ها، تهیه گردید.

کلیدواژه‌ها: مذاب شیشه‌ی سربی، حباب‌زدایی، وابستگی دما، وابستگی زمانی

Bubble Removing from Lead Silicate Glass Melts

R.A. Rahimi*, A. Hamidi, M. Naghavi

Material Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 31485-498, Karaj – Iran

Abstract: In melting process of lead silicate glasses containing 70 wt% PbO, the bubble size distribution, and the manner of formation and elimination of gas bubbles of glass melt at different temperatures and times were investigated. The lead silicate glass was manufactured by melting, fritting and milling of glass powder for several stages. At first, 50 grams of lead silicate glass powder was poured into each alumina crucible for maintaining the batches separately at temperatures of 900, 950, 1000, 1050 and 1100°C for 15, 30 and 45 minutes, to study the effects of time and temperature on the bubble nucleation, growth and ascension from the lead silicate glass melt. Because of the dissolution of air molecules inside the glass melt and owing to the achievement of super-saturation, gas bubbles were nucleated and grown. Due to the density of the gradient between the gas bubbles and glass melt, the bubbles ascended to the surface of the melt where they ruptured afterwards. The density of alumina crucibles and the glass inside them were measured. The volume and the mean value of the diameter of bubbles were determined by images from the lateral cross section of glass inside crucibles and from the images taken from the surface of the bubbly glassy layer on the surface of the samples.

Keywords: Lead Silicate Glass Melt, Bubble Removing, Temperature Dependence, Time Dependence



۱. مقدمه

در مرحله‌ی تشکیل حباب، حباب‌های با اندازه‌های مختلف تشکیل می‌شود. تعادل ترمودینامیکی و حل شدن مولکول‌های هوا و انتقال آن‌ها به درون مذاب شیشه، موجب می‌شود حباب‌های کوچک تحلیل رفته و حباب‌های بزرگ رشد کنند. این عمل باعث کاهش چشمگیر تعداد حباب‌های درون مذاب می‌شود. در حالی که در حجم حباب‌های گاز محبوس در مذاب، تغییر محسوسی رخ نمی‌دهد، کاهش حجم حباب‌های درون مذاب صرفاً در اثر صعود حباب و ترکیدن آن در سطح انجام می‌شود. نیروهای هم‌رفتی که به منظور ایجاد یکنواختی ترکیب اعمال می‌شوند، می‌توانند سرعت انجام این کار را بیش‌تر کنند [۴، ۵]، [۶]. با توجه به اختلاف چگالی حباب با مذاب شیشه، نیرویی بالا برنده از طرف مذاب به حباب وارد می‌شود که مطابق فرمول هادامارد-ریزنسکی^(۱)، به صورت زیر بیان می‌گردد

$$U = \frac{\rho g a^2}{3\eta} \quad (2)$$

که در آن ρ چگالی مذاب شیشه، η گرانروی مذاب شیشه، g شتاب گرانشی و a قطر حباب گاز می‌باشند.

وجود حباب‌های گاز و ذرات سیلیس ذوب نشده در شیشه، کیفیت محصول شیشه را کاهش داده و در خیلی از موارد اثرات زیانبار اقتصادی به بار می‌آورد. در تولید این نوع شیشه‌ها در کوره‌های صنعتی، پس از ذوب تمامی مواد اولیه‌ی شیشه، در مرحله‌ی بعدی اقداماتی برای تهیه‌ی مذاب عاری از حباب و یکنواختی از نظر ترکیب شیمیایی انجام می‌شود. لذا با استفاده از هم‌زن‌های تعبیه شده، عمل هم‌زنی مذاب برای رسیدن به مذاب یکنواخت انجام می‌شود. در این مرحله، حباب‌هایی که در فرایند ذوب تشکیل شده بودند با عملیات هم‌زنی و برخورد با یک‌دیگر رشد کرده و در اثر صعود از مذاب خارج می‌شوند [۷، ۸، ۹، ۱۰].

در کار حاضر به دلیل عدم وجود امکانات صنعتی فوق‌الذکر، با استفاده از روش ذوب، گداخت و آسیاب طی چندین مرحله، عملیات یکنواخت‌سازی مذاب شیشه انجام گرفت. به همین دلیل، عملیات حباب‌زدایی نیز بر مبنای روش ذوب مجدد پودر شیشه‌ی سربی مورد مطالعه قرار گرفت. لذا نحوه‌ی تشکیل و کاهش حباب در دما و زمان‌های مختلف با تهیه‌ی تصاویر، اندازه‌گیری اندازه و تعداد آن‌ها، مورد مطالعه قرار گرفت.

در صنعت ساخت شیشه، مواد خام به طور پیوسته وارد کوره می‌شوند و در انتها محصول شیشه تولید می‌شود. با افزایش دما و انجام واکنش‌های شیمیایی در ورودی کوره، محصولات جدید و زود ذوب تشکیل می‌شوند. مذاب، مواد دیر ذوب را در خود حل می‌کند. این عمل با افزایش دمای کوره و با توجه به سینتیک واکنش‌های شیمیایی، به مرور و طی چندین ساعت انجام می‌شود.

در شیشه‌های سربی مورد استفاده در سلول‌های داغ، حجم بالایی از ترکیب شیشه را سرب اکسید تشکیل می‌دهد. این اکسید در حضور سیلیس، در دماهای پایین‌تر مذاب‌های با مقدار سرب بالا و زود ذوب تشکیل می‌دهد. در ادامه و به مرور زمان، با حل مقدار سیلیس بیش‌تر در درون مذاب غنی از سرب، غلظت و مقدار سیلیس مذاب افزایش می‌یابد. در دماهای پایین‌تر به دلیل اشباع مقدار سیلیس حل شده در مذاب، برای حل مقدار بیش‌تر از آن محدودیت وجود دارد. اگر دمای کوره پایین نگه داشته شود، مذاب اولیه منجمد شده و سرعت واکنش حل شدن سیلیس در مذاب به صفر می‌رسد. لذا دمای کوره باید افزایش یابد تا واکنش فوق در دمای بالاتر تکمیل شود.

در فرایند ذوب پودر شیشه، حل شدن هوای محبوس بین ذرات پودر، در درون مذاب شیشه‌ی سربی، باعث می‌شود غلظت مولکول‌های هوا در درون مذاب افزایش یابد [۱]. در حالت فوق اشباع، حباب‌های هوا درون مذاب شیشه جوانه‌زنی می‌کنند [۲، ۳]. انرژی آزاد کل برای جوانه‌زنی حباب درون مذاب، تحت تأثیر دو عامل انرژی آزاد حباب، که همواره منفی است، و انرژی سطحی، که همواره مثبت است، قرار دارد. انرژی آزاد همواره به تشکیل حباب کمک می‌کند ولی انرژی سطحی به عنوان عامل بازدارنده عمل می‌کند. رابطه‌ی تغییرات انرژی آزاد جوانه‌زنی چنین است

$$\Delta G = \frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_f + 4\pi r^2 \sigma \quad (1)$$

که در آن ΔG انرژی آزاد کل جوانه‌زنی حباب، ΔG_f کاهش انرژی آزاد در نتیجه‌ی جوانه‌زنی حباب با شعاع r ، و σ انرژی سطحی حباب می‌باشند. هر اندازه شعاع حباب کوچک باشد، انرژی سطحی به همان اندازه غالب بوده و باعث تجزیه و حل شدن حباب می‌شود. در صورتی که اندازه‌ی حباب از یک مقدار معین بزرگ‌تر باشد و رشد آن باعث کاهش انرژی آزاد سیستم شود، حباب رشد خواهد کرد.



که در آن D چگالی و V کسر حجمی، زیرنویس‌های g ، t و c بیان‌گر کل، شیشه و بوتنه می‌باشند.

شیشه‌ی درون بوتنه به دو بخش: لایه‌ی جابی روی سطح شیشه و لایه‌ی زیری به صورت شیشه‌ی یکنواخت و بدون جاب تقسیم شده است. در تمامی نمونه‌هایی که شیشه‌ی درون بوتنه دارای هر دو بخش بدون جاب و با جاب بود، شیشه‌ی ناحیه‌ی جابی با تراش و پولیش به طور کامل برداشته شد. با تعیین وزن و با معلوم بودن چگالی شیشه‌های با و بدون جاب، حجم جاب موجود در هر کدام از نمونه‌ها، و از آن‌جا وزن شیشه‌ی بدون جاب تعیین شد. با توجه به مشخص بودن چگالی شیشه‌ی بدون جاب، حجم شیشه از طریق تقسیم وزن شیشه بر چگالی شیشه برای هر کدام از نمونه‌ها و حجم شیشه‌ی بدون جاب نیز به همان ترتیب تعیین شد. تعیین وزن، و حجم شیشه‌ی جاب‌دار با معلوم بودن چگالی آن به روشی مشابه با شیشه‌ی بدون جاب انجام و از روی اختلاف حجم‌ها حجم جاب تعیین شد.

برای تعیین ضخامت لایه‌ی جاب، ابتدا بوتنه‌های حاوی شیشه شکسته شدند. ضخامت سطح شکست اندازه‌گیری گردید. ابعاد اندازه‌گیری شده با ابعاد حاصل از تصاویر سطوح جانبی که مقیاس آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار Image J تغییر یافته بود، مورد مقایسه قرار گرفت. به دلیل نزدیکی خیلی زیاد این دو به یک‌دیگر، نتایج حاصل از اندازه‌گیری ضخامت لایه‌ی جاب با استفاده از تصاویر گزارش گردید. اندازه‌گیری اندازه‌ی جاب‌ها روی تصاویر تهیه شده با استفاده از نرم‌افزار Image J برای سطح معینی از تصاویر و برای جاب‌هایی که تقریباً واضح بودند، انجام شد.

۳. نتایج و بحث

شکل ۱ تصویرهای بوتنه‌های اکسید آلومینیمی را که پس از خنک شدن مذاب، شیشه‌ی سربی درون آن‌ها شکسته شده است، نشان می‌دهد. پودر شیشه‌ی سربی در دما و زمان‌های مختلف مشخص شده در زیر تصویرها تحت عملیات حرارتی قرار گرفته است. این تصویرها به نوعی نحوه‌ی تشکیل شیشه‌ی کاملاً جاب‌دار و متخلخل و پس از آن تشکیل لایه‌ی شیشه‌ای بدون جاب و رشد آن در دما و زمان‌های مختلف و حذف کامل جاب را نشان می‌دهند. در دمای 900°C و زمان ۱۵ دقیقه ساختار مذاب به طور

۲. روش کار

سیلیس همدان با مقدار SiO_2 بالای ۹۹/۹ درصد، سرنج Pb_2O_4 ایرانی و مواد شیمیایی با خلوص بالا از قبیل ZrO_2 ، TiO_2 ، Na_2O ، K_2O و As_2O_3 تهیه شده از شرکت آلدریچ، به عنوان مواد خام (اولیه‌ی) شیشه‌ی سربی با ترکیب شیمیایی مندرج در جدول ۱ انتخاب شدند. ابتدا مواد خام شیشه‌ی سربی در دمای 1300°C در مدت دو ساعت ذوب و مذاب حاصل درون آب تخلیه گردید. فریت حاصل، با استفاده از آسیاب گلوله‌ای با آستری پلاستیکی و گلوله‌های اکسید آلومینیمی تا زیر $200\mu\text{m}$ ، به صورت تر آسیاب شد. محصول آسیاب در خشک‌کن آزمایشگاهی در دمای 110°C خشک شد. سپس ۵۰ گرم پودر شیشه به درون بوتنه‌های اکسید آلومینیمی که قبلاً وزن، چگالی و میزان تخلخل باز آن‌ها اندازه‌گیری شده بود، به طور جداگانه ریخته شد. این بوتنه‌ها به مدت ۱۵، ۳۰ و ۴۵ دقیقه در درون کوره‌ی آزمایشگاهی (ساخت شرکت اکسایتون، تهران- ایران) در دماهای 900°C ، 950°C ، 1000°C و 1100°C قرار داده شدند. پس از خاتمه‌ی عملیات حرارتی، چگالی بوتنه‌ی اکسید آلومینیمی و شیشه‌ی درون آن با استفاده از روش ارشمیدس و با اندازه‌گیری وزن‌های خشک، تر و غوطه‌ورسازی در آب مقطر محاسبه گردید. با استفاده از دوربین عکاسی، عکس‌هایی از مقطع جانبی شیشه‌ی درون بوتنه و از جاب‌های ایجاد شده در شرایط مختلف دما و زمان عملیات حرارتی تهیه گردید. چگالی بوتنه‌ی تنها و بوتنه‌ی همراه با شیشه‌ی درون آن با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد

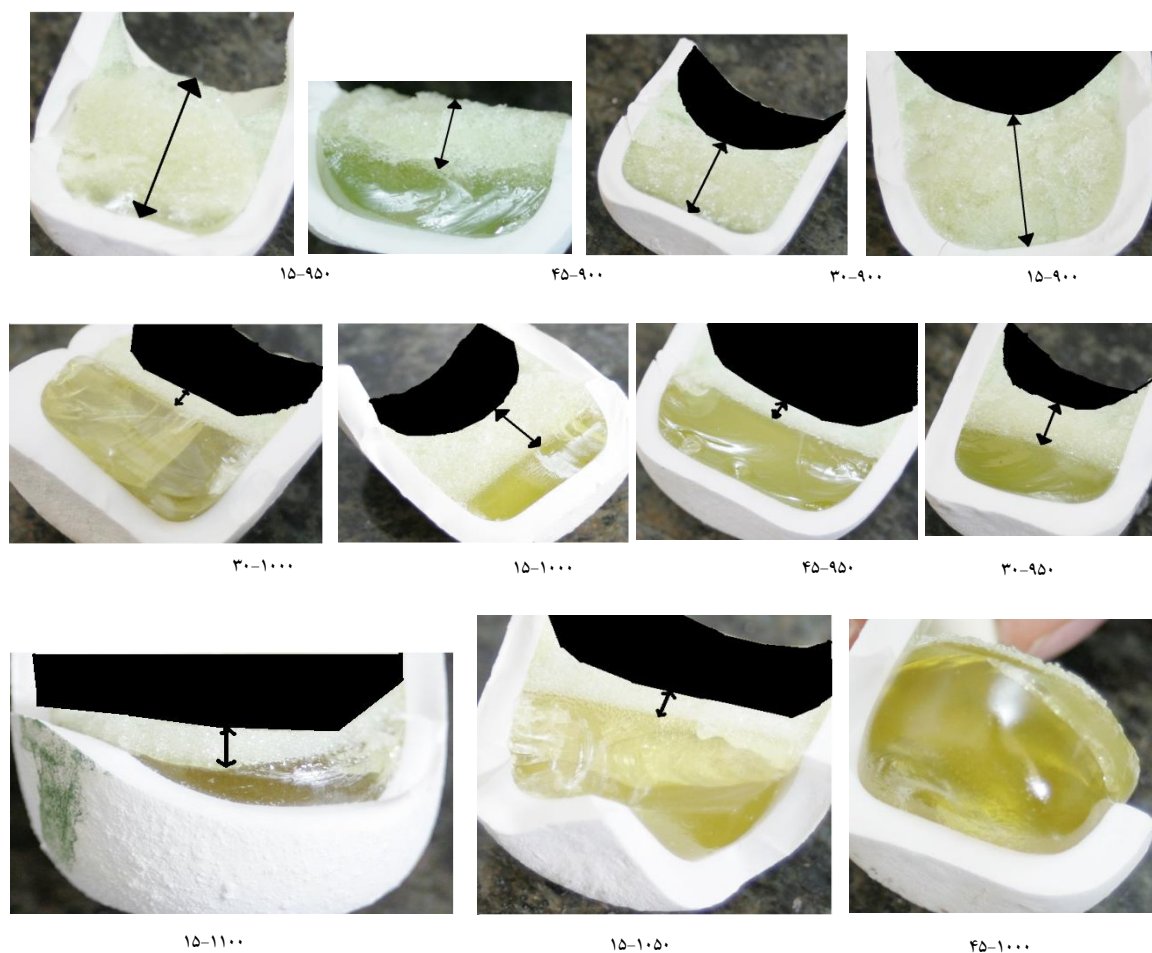
$$d = \frac{W_d}{W_d - W_{im}} \quad (3)$$

که در آن d چگالی، W_d وزن خشک و W_{im} وزن در زمان غوطه‌وری می‌باشند. با به دست آوردن چگالی بوتنه‌ها با و بدون شیشه (برای هر کدام از نمونه‌ها) از رابطه‌ی بالا، چگالی شیشه‌ی درون بوتنه‌ها که ترکیبی از چگالی کل شیشه با جاب و بدون جاب است، از رابطه زیر محاسبه می‌شود

$$D_t = D_g V_g + D_c V_c \quad (4)$$

جدول ۱. ترکیب شیمیایی شیشه‌ی سربی بر حسب درصد وزنی

Al ₂ O ₃	As ₂ O ₃	Alkaline (Na, K)	TiO ₂	ZrO ₂	SiO ₂	PbO	ترکیب
۲٫۲	۰٫۳	۱٫۶	۱	۲٫۴	۲۴	۶۸٫۵	درصد
							وزنی



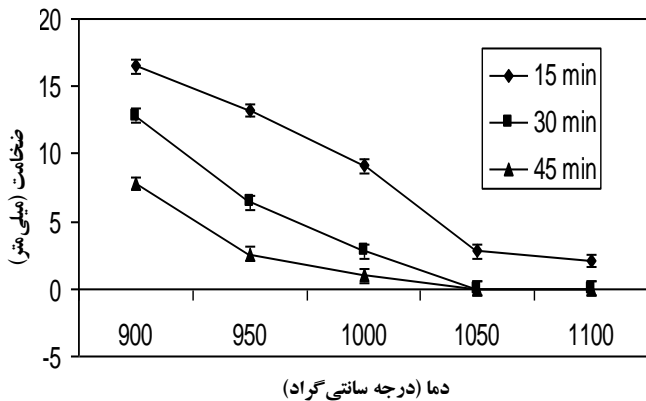
شکل ۱. تصویرهای جانبی نمونه‌های مختلف شیشه‌ی سربی درون بوتله که در شرایط مختلف دما- زمان تحت عملیات حرارتی قرار گرفته‌اند. لایه‌ی حباب روی سطح مذاب با پیکان نشان داده شده است.

مورد بحث به این علت چشمگیر است که میزان سرب موجود در ترکیب شیشه زیاد است. با توجه به این که سرعت صعود و به طور کلی حرکت یک حباب گازی درون یک مایع، بستگی عکس به گرانروی مذاب و همچنین بستگی مستقیم به اختلاف چگالی حباب گازی و مایع دارد، گرانروی مذاب شیشه‌ی سربی به دلیل بالا بودن مقدار سرب مذاب و ایجاد گسست نسبتاً زیادتر در پیوندهای محکم سیلیکاتی نسبت به مذاب شیشه‌های معمولی، خیلی کم‌تر است. هم‌چنین چگالی مذاب شیشه‌ی سربی (۵/۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب) نسبت به شیشه‌ی معمولی (۲/۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب) تقریباً دو برابر است، لذا سرعت صعود حباب در مذاب شیشه‌ی سربی خیلی بیش‌تر است. عملاً به محض این که حباب‌ها تشکیل می‌شوند حتی در دمای نسبتاً پایین 900°C ، به سمت سطح مذاب حرکت می‌کنند و با گذشت زمان ضخامت لایه حباب با ترکیدن حباب‌های گازی در سطح کم می‌شود.

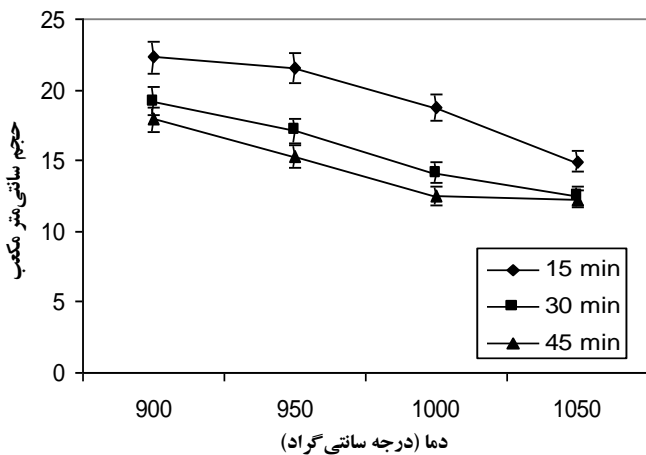
یکنواخت و کامل حباب‌دار است. با افزایش زمان نگهداری در این دما در زمان ۳۰ دقیقه، همان‌گونه که در تصویر مشاهده می‌شود، رنگ ناحیه‌ی حبابی در نواحی زیرین بوتله کدرتر شده است. تغییرات فوق نشان می‌دهد که حباب‌های درشت‌تر با سرعت بیش‌تری به سمت بالا حرکت کرده و حباب‌های ریز هنوز در لایه‌های زیری قرار دارند و هم‌چنین ضخامت لایه‌ی شیشه‌ای بین حباب‌ها افزایش و برعکس از حجم حباب‌ها در لایه‌های پایینی کاسته شده است. در زمان ۴۵ دقیقه، یک لایه‌ی شیشه‌ی کاملاً عاری از حباب با ضخامت قابل‌ملاحظه تشکیل شده است. با افزایش دما در زمان ثابت ۱۵ دقیقه، همان پدیده‌ی دمای ثابت با زمان متغیر اتفاق افتاده است، به طوری که در دمای 1100°C حباب‌ها هنوز کاملاً از بین نرفته‌اند. نکته‌ی جالبی که در این تصویرها مشاهده می‌شود این است که بین لایه‌ی حباب و بدون حباب یک مرز وجود دارد، به طوری که در لایه‌ی زیری هیچ‌گونه حبابی مشاهده نمی‌شود. این رفتار در شیشه‌ی سربی



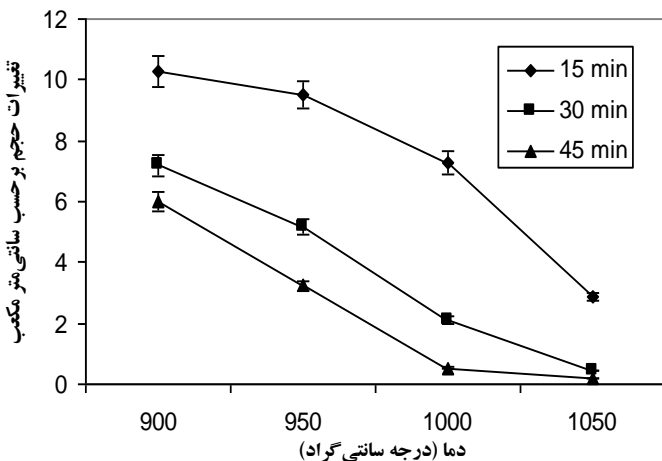
جاب‌ها امکان رشد پیدا کرده و بزرگ شده‌اند که در ادامه نیز سریع‌تر از دیگر جاب‌ها از نمونه خارج شده‌اند.



شکل ۲. رابطه بین ضخامت لایه‌ی جاب و دما در زمان‌های عملیات حرارتی مختلف.



شکل ۳. رابطه بین حجم (سانتی‌متر مکعب) جاب شیشه و دما در زمان‌های مختلف.

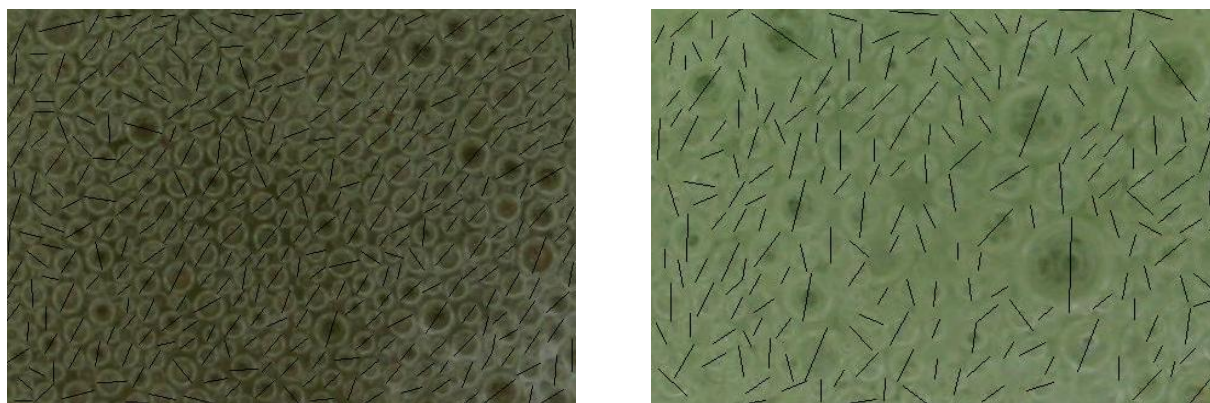


شکل ۴. رابطه بین حجم (سانتی‌متر مکعب) جاب و دما در زمان‌های مختلف.

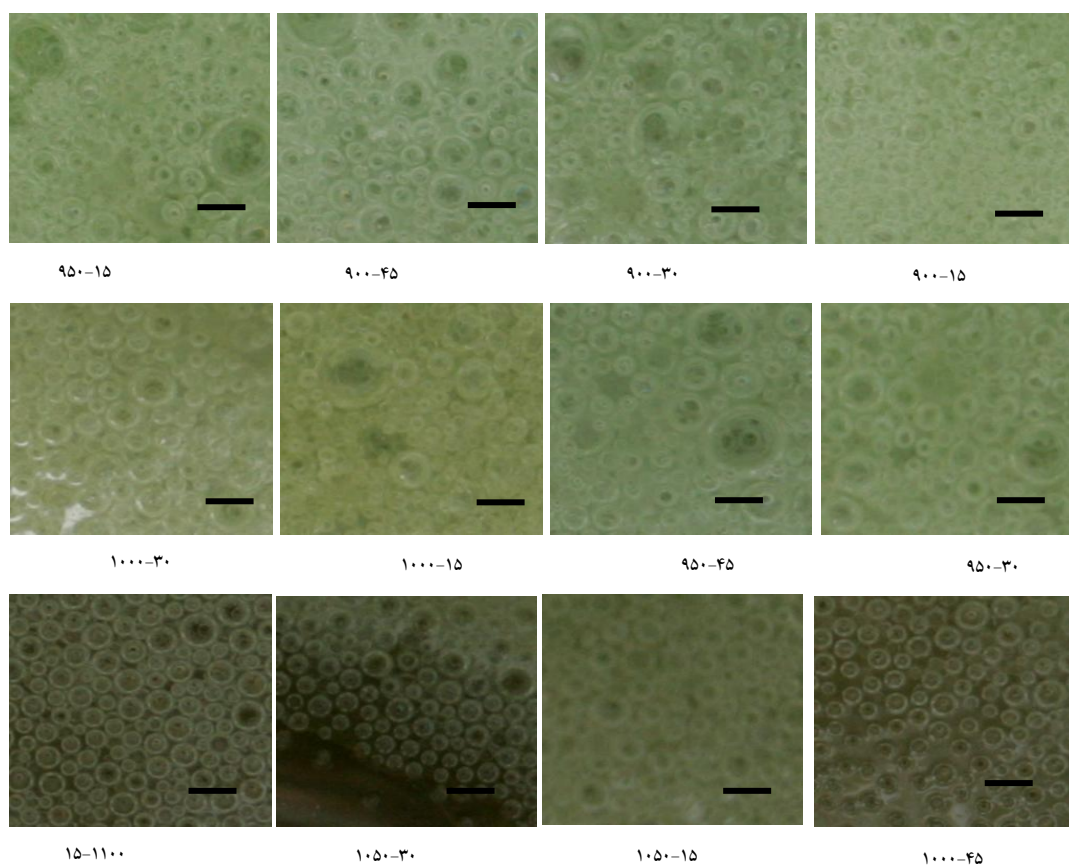
شکل‌های ۲، ۳ و ۴ به ترتیب، ضخامت لایه‌ی جاب، تغییرات حجم توأمان جاب و شیشه و هم‌چنین تغییرات حجم (سانتی‌متر مکعب) جاب برای هر کدام از شرایط دما و زمان مشخص را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود ضخامت ناحیه‌ی جاب و هم‌چنین حجم جاب به طور کلی در دما و زمان عملیات حرارتی پایین (900°C)، کم‌ترین هستند. با افزایش دما و زمان عملیات حرارتی از مقادیر آن‌ها کاسته شده و در نهایت برای زمان عملیات حرارتی ۳۰ و ۴۵ دقیقه در دمای 1050°C به طور کامل جاب‌ها از مذاب خارج می‌شوند ولی برای زمان عملیات حرارتی ۱۵ دقیقه، در دمای 1100°C مذاب هنوز دارای لایه‌ی جابی است.

شکل ۵ نمونه‌ای از تصویرهای سطح دو نمونه شیشه که در دما و زمان‌های مختلف تحت عملیات حرارتی قرار گرفته‌اند را نشان می‌دهد که با شرایط یکسان از نظر بزرگ‌نمایی تهیه شده‌اند. جاب‌ها در این تصاویر تقریباً واضح هستند. این تصاویر به عنوان نمونه برای نشان دادن نحوه‌ی اندازه‌گیری قطر جاب در یک سطح معین، برای هر کدام از نمونه‌ها انتخاب شده‌اند. با این روش، اندازه‌ی میانگین، انحراف از اندازه‌ی میانگین و انحراف معیار برای نمونه‌های مختلف اندازه‌گیری و محاسبه شده است.

شکل ۶ تصویرهای سطح نمونه‌های مختلف مذاب شیشه‌ی سری را که در دما و زمان‌های مختلف تحت عملیات حرارتی قرار گرفته‌اند نشان می‌دهد. این شکل به منظور نشان دادن نحوه‌ی توزیع اندازه‌ی جاب و تغییرات ایجاد شده روی اندازه‌ی جاب‌های موجود در نمونه‌های مختلف در شرایط مختلف عملیات حرارتی از نظر دما و زمان تهیه شده است. اندازه‌ی خطی که روی شکل‌ها نشان داده شده است مقیاس یک میلی‌متر از سطح را نشان می‌دهد. در تمام شرایط عملیات حرارتی همواره جاب‌های با اندازه‌ی کوچک حضور دارند ولی جاب‌های با اندازه‌ی خیلی بزرگ‌تر در نمونه‌هایی که در دما و زمان پایین تحت عملیات حرارتی قرار گرفته‌اند حضور ندارند. در دما و زمان عملیات حرارتی 900°C و ۱۵ دقیقه، جاب‌ها هنوز به اندازه‌ی کافی رشد نکرده‌اند. با افزایش دما و زمان عملیات حرارتی جاب‌های با اندازه‌ی بزرگ‌تر ایجاد و به سرعت از تعداد آن‌ها کاسته شده است به طوری که از دما و زمان عملیات حرارتی به ترتیب 1000°C و ۳۰ دقیقه به بالا، تقریباً جاب‌های با اندازه‌ی بزرگ کاملاً از نمونه‌ها حذف شده‌اند. با گذشت زمان و هم‌چنین با افزایش دما به نظر می‌رسد که با ایجاد شرایط مطلوب برخی



شکل ۵. تصویری از حباب‌های سطح نمونه که میانگین اندازه‌ی قطر آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار Image J تعیین شده است.



شکل ۶. تصویرهای حباب‌ها در سطح نمونه‌هایی که در شرایط مختلف تحت عملیات حرارتی قرار گرفته‌اند.

یافته و در ورای دمای 1050°C میانگین اندازه‌ی آن‌ها کاهش یافته است. در صورتی که در مورد هر دو زمان عملیات حرارتی ۳۰ و ۴۵ دقیقه، میانگین اندازه‌ی حباب‌ها با افزایش دما کاهش یافته است. تغییرات انحراف از میانگین و انحراف معیار حباب‌ها در نمونه‌های مختلف نشان می‌دهد که در شرایط دمایی پایین عملیات حرارتی مقادیر هر دو زیاد است ولی در زمان‌های مختلف تفاوت جزئی با یک‌دیگر دارند. با افزایش دمای عملیات حرارتی هر دوی این مقادیر کاهش یافته‌اند. با مقایسه‌ی این نتایج

شکل‌های ۷، ۸ و ۹ نمودار تغییرات میانگین اندازه، انحراف از میانگین اندازه و انحراف معیار نمونه‌ها در شرایط مختلف عملیات حرارتی را نشان می‌دهند. اندازه‌ی حباب‌ها با استفاده از روشی که در توضیح شکل ۵ ذکر شد، تعیین شده است. با استفاده از داده‌های حاصل از اندازه‌گیری، ابتدا مقادیر میانگین اندازه، انحراف از میانگین و انحراف از معیار محاسبه و سپس نمودارهای مربوطه رسم شده‌اند. شکل ۷ زمان عملیات حرارتی ۱۵ دقیقه را نشان می‌دهد، با افزایش دما اندازه‌ی حباب‌ها افزایش



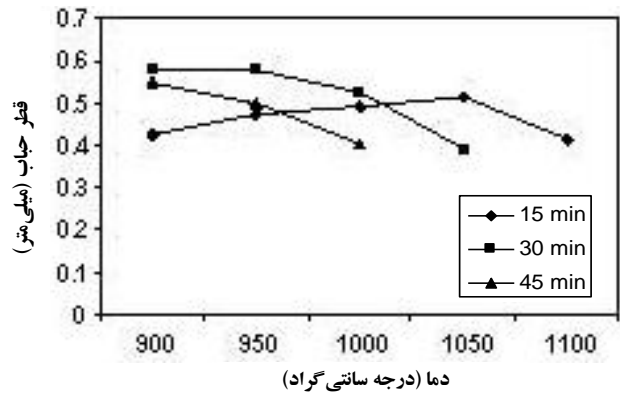
مقدار میانگین اندازه‌ی حباب‌ها در دمای 900°C و در زمان ۱۵ دقیقه نسبت به زمان‌های دیگر کم است. این شکل نشان می‌دهد که تعداد حباب‌های خیلی بزرگ نشان داده شده در شکل ۶، آن قدر کم بوده است که تأثیری در افزایش مقدار میانگین اندازه‌ی حباب در دمای 900°C و زمان ۱۵ دقیقه نداشته است. در ارتباط با تغییرات اندازه‌ی میانگین حباب‌ها با افزایش دمای عملیات حرارتی در زمان‌های عملیات حرارتی ۳۰ و ۴۵ دقیقه، می‌توان وابستگی اندازه‌ی حباب‌ها در هنگام ترکیدن و حذف آن‌ها از سطح نمونه به گرانروی مذاب را نتیجه گرفت. با افزایش دمای عملیات حرارتی و کاهش متعاقب گرانروی مذاب، حباب مجال رشد را به دست نمی‌آورد و در اندازه‌ی کوچک‌تر می‌ترکد.

۴. نتیجه‌گیری

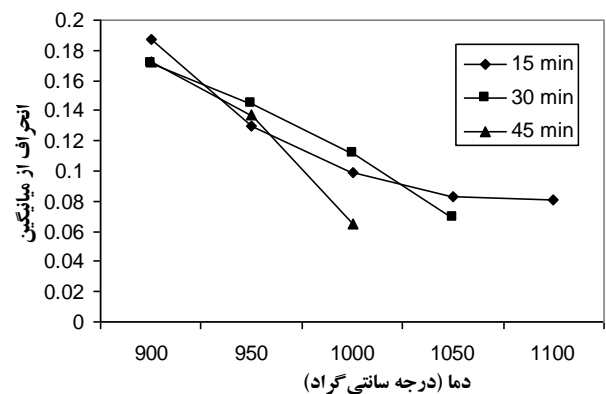
نتایج نشان داد که تشکیل حباب‌ها در شروع عملیات ذوب پودر آسیاب شده‌ی شیشه سربی در دمای 900°C و زمان ۱۵ دقیقه در تمامی نواحی نمونه شروع می‌شود. با افزایش دما و زمان عملیات حرارتی یک لایه حباب در سطح مذاب شیشه‌ی عاری از حباب تشکیل می‌شود. ضخامت این لایه با افزایش دما و زمان عملیات حرارتی کاهش می‌یابد به طوری که تقریباً از دمای 1050°C و زمان ۳۰ دقیقه به بعد عملاً تمامی حباب‌های سطح نمونه از بین می‌روند. اندازه‌ی حباب‌ها در دمای 900°C و زمان ۱۵ دقیقه کوچک است و با افزایش دما در زمان ثابت، میانگین اندازه‌ی حباب‌ها افزایش می‌یابد ولی در زمان‌های بالاتر در دمای 900°C میانگین اندازه‌ی حباب‌ها بزرگ است. با افزایش دما و زمان عملیات حرارتی حباب‌های بزرگ در سطح نمونه با ترکیدن از آن خارج می‌شوند. در نتیجه اندازه‌ی میانگین حباب‌ها کاهش می‌یابد. بالا بودن مقادیر انحراف از میانگین در دماهای پایین‌تر به دلیل وجود حباب‌های با اندازه‌ی خیلی بزرگ‌تر است که با حذف آن‌ها حباب‌ها تقریباً یکدست‌تر می‌شوند.

پی‌نوشت:

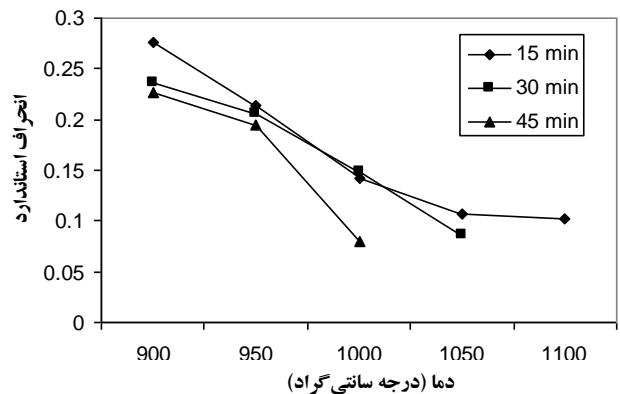
۱. Hadamard-Rybczynsky



شکل ۷. تغییرات اندازه‌ی متوسط حباب در دما و زمان‌های مختلف.



شکل ۸. تغییرات انحراف از میانگین اندازه‌ی حباب در دما و زمان‌های مختلف.



شکل ۹. تغییرات انحراف معیار نمونه‌ها در دما و زمان‌های مختلف.

با تصویرهای مربوط به اندازه‌ی حباب‌ها در شکل ۶، مشاهده می‌شود که در دمای پایین حباب‌های با اندازه‌ی خیلی بزرگ‌تر وجود دارند. حضور این حباب‌ها باعث افزایش مقادیر انحراف از میانگین و انحراف معیار شده است، به طوری که کاهش مقادیر انحراف از میانگین و انحراف معیار در دمای بالا خروج این حباب‌ها در دمای بالاتر را تأیید می‌کند. شکل ۷ نشان می‌دهد که



1. Reiner Kirchheim, Solubility of gases in vitreous silica described by a distribution of dissolution energies, *J. Am. Ceram. Soc.*, 84(4) (2001) 2699-701.
2. Nadav G. Lensky, Ron W. Niebo, John R. Holloway, Vladimir Lyakhovsky, Oded Navon, Bubble nucleation as a trigger for xenolith entrapment in mantle melts, *Earth and Planetary Science Letters* 245 (2006) 278-288.
3. Ho-young Kwak, Ki-Moon Kang, Gaseous bubble nucleation under shear flow, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52 (2009) 4929-4937.
4. Kang-Wen K. Li and Alfred Schneider, Rise Velocities of large Bubbles in Viscous Newtonian Liquids, *J. Am. Ceram. Soc.*, 76(1) (1995) 241-244.
5. D. Powers, T. Mcneil, R.S. Subramanian, R. Cole, Bubble rise in glassmelts, *J. Am. Ceram. Soc.*, 65 (6) (1982) 289-292.
6. Emery J. Hornyak, Michael C. Weinberg, Velocity of a freely rising gas bubble in a soda-lime silicate glass melt, *Communications of the American Ceramic Society*, C-244- C246 (1984).
7. Margaritis Kostoglou, Thodoris D. Karapantsios, Bubble dynamics during the non-isothermal degassing of liquids. Exploiting microgravity conditions, *Advances in Colloid and Interface Science*, 134-135 (2007) 125-137.
8. F. Pigeonneau, Mass transfer of a rising bubble in molten glass with instantaneous oxidation-reduction reaction, *Chemical Engineering Science*, 64 (2009) 3120-3129.
9. Lubomir Nemeč, Refining in the Glassmelting Process, *J. Am. Ceram. Sic*, 60 (9-10) (1977) 436-440.
10. J.I. Ramos, Behavior of multicomponent gas bubbles in glass melts, *J. Am. Ceram. Soc.*, 69(2) (1996) 149-54.