

بررسی عوامل موثر بر قابلیت فومی شدن شیشه های سیستم SiO₂-Al₂O₃-MgO-CaO

سوسن هاشمی نیا

۱- استادیار، گروه مکانیک، واحد مرند، دانشگاه آزاد اسلامی، مرند، آذربایجان شرقی، ایران

s.hashemini@yahoo.com

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۲/۱۰، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۵/۱۶)

چکیده

در این پژوهش عوامل موثر بر رفتار فومی شدن و تبلور شیشه انتخابی بر پایه فاز دایوپساید، با افزودن ۲ درصد وزنی SiC به عنوان عامل فومزا به روش زینتر مورد بررسی قرار گرفت. بررسی‌ها نشان داد بالا بودن دمای نرم شونده شیشه انتخابی و همچنین وقوع تبلور در آن یکی از عوامل اصلی در فومی نشدن آن می‌باشد. در این راستا تاثیر افزودن اکسید بور و سرب بر قابلیت فوم دار شدن شیشه‌ها نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد که با افزودن اکسید سرب به علت بهبود قابلیت تر شونده شیشه با ذرات SiC مورد نظر، افزایش بازیسته نوری و افزایش فاصله دمایی بین دمای انتقال به شیشه و دمای شروع تبلور، فوم دار شدن بهبود یافت. زاویه تر شونده در فصل مشترک شیشه-SiC در مورد ترکیب فاقد اکسید سرب ۸۵° و در مورد ترکیب حاوی ۱۵ درصد وزنی اکسید سرب به ۵۵° کاهش یافت. در صورتی که در شیشه‌های حاوی اکسید بور علی‌رغم وسیع شدن محدوده دمایی بین دمای شروع پیک تبلور و دمای انتقال به شیشه، به علت کاهش پارامتر بازیسته نوری فوم دار شدن به طور مطلوبی صورت نگرفت.

واژه‌های کلیدی:

فوم شیشه-سرامیک، زینترینگ، دایوپساید.

۱- مقدمه

سدسازی، خیابان‌ها و بزرگراه‌ها، فاضلاب، زمین‌های ورزشی و غیره به خود اختصاص داده است. مقادیر تخلخل، دانسیته ظاهری و استحکام فشاری فوم‌های شیشه تجاری به ترتیب ۸۵-۹۵ درصد حجمی، ۰/۳-۰/۱ gr/cm³ و ۰/۴-۶ MPa می‌باشد [۱]. هزینه تولید فوم‌های شیشه‌ای یک عامل مهم در استفاده از آنها در صنعت ساختمان است. برای کاهش هزینه‌های تولید، تغییرات زیادی در روش‌های فرآوری و مواد اولیه صورت گرفته است که با جایگزینی روش پودری (زینترینگ) به جای روش دمیدن گاز صرفه‌جویی قابل توجهی در مصرف انرژی شده است. چون

فوم‌های شیشه‌ای موادی هستند با پیکره شیشه‌ای که در آن حفرات بسته میکرونی توسط دیواره‌های نازک شیشه‌ای احاطه و از یکدیگر جدا شده‌اند. این مواد به دلیل وزن مخصوص کم، مقاوم بودن در برابر آب، بخار آب و اسیدها (بجز HF)، ثبات ابعادی (حتی تحت تاثیر رطوبت، دما و بارگذاری)، غیرقابل اشتعال بودن، هدایت حرارتی و صوتی ناچیز، استحکام فشاری مطلوب و مقاوم بودن در برابر نفوذ و رشد باکتری‌ها و حشرات موذی، کاربردهای بسیار باارزشی را در صنایع ساختمان‌سازی، پی‌ریزی خطوط ریلی،

عموما فاز بلورینی است که در این سیستم متبلور می‌شود و عوامل بهبود استحکام مکانیکی محصول می‌شود. بر اساس مطالعات اجمالی، پژوهشی در رابطه باتهیه فوم های شیشه - سرامیک دایوپسایدی انجام نشده است. در کار حاضر، تاثیر اکسید سرب و بور بر رفتار فوم دار شدن شیشه مبتنی بر فاز دایوپساید بررسی شده است. در این راستا رفتار زینترینگ و تبلور نمونه‌های حاوی و عاری از SiC و همچنین واکنش های شیمیایی انجام شده در فصل - مشترک شیشه-SiC مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲- فعالیت های تجربی

در این پژوهش از نتایج تحقیقات قبلی [۲۰] برای انتخاب ترکیب شیشه پایه استفاده شد. فهرست و ویژگی های مواد اولیه مورد استفاده در این پژوهش در جدول (۱) آورده شده است. آنالیز شیمیایی شیشه‌های مورد استفاده قرار گرفته در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول (۱): مشخصات مواد اولیه مورد استفاده

درجه خلوص / شرکت تولید کننده	فرمول	ماده شیمیایی
سیلیس همدان اسید شویی شده با خلوص بیش از ۹۹٪	SiO ₂	اکسید سیلیسیم
Martinzwerk-MR42 با خلوص بیش از ۹۹ درصد	Al ₂ O ₃	اکسید آلومینیوم
Merck-7405 با خلوص بالای ۹۹ درصد	PbO	اکسید سرب
Merck-102069 با خلوص بالای ۹۹ درصد	CaCO ₃	کربنات کلسیم
Merck-5870 با خلوص بالای ۹۹ درصد	Mg(OH) ₃	هیدروکسید منیزیم
Merck-106398 با خلوص بالای ۹۹ درصد	Na ₂ CO ₃	کربنات سدیم
Merck-103924 با خلوص بالای ۹۹ درصد	K ₂ CO ₃	کربنات پتاسیم
Merck-162 با خلوص بالای ۹۹ درصد	H ₃ BO ₃	اسید بوریک
مش ۶۰۰ - محصول شرکت Jean Wirtz	SiC	کاربید سیلیسیم

فریت‌های به دست آمده توسط دستگاه اندازه گیری لیزری توزیع ذرات (Fritsch Analysete 22) مورد بررسی قرار گرفت، که میانگین اندازه ذرات ۴-۵ میکرون بود. به منظور بررسی رفتار فوم- دار شدن شیشه‌های انتخاب شده از ۲٪ وزنی پودر SiC (تجاری)

زینترینگ در دمای پایین تری نسبت به روش دمیدن گاز انجام می‌شود [۲]. تولید فوم شیشه از شیشه‌های ضایعاتی و خرده شیشه [۳-۶]، شیشه های ضایعاتی حاصل از مواد الکترونیکی (CRT) [۷-۱۵] و همچنین استفاده از انواع سرباره‌های حاصل از ذوب فلزات و خاکستر آتشفشانی [۱۶-۱۷] هم به کاهش هزینه تولید و هم به پاکیزه شدن محیط کمک می‌کند.

بیان شده است برای اینکه شیشه‌ای قابلیت فوم دار شدن داشته باشد بایستی تمایل کمتری به تبلور داشته باشد. بلورها بر گرانروی ظاهری شیشه و رفتار فوم دار شدن آن تاثیر می‌گذارند. همچنین، بعلت عدم تطابق ضریب انبساط حرارتی شیشه و بلور، یکنواختی ریزساختار در فوم حاصل از بین می‌رود، که این موضوع باعث ایجاد حفرات باز یا ترکدار شده و در نهایت رفتار عایق حرارتی و همچنین استحکام مکانیکی فوم شیشه کاهش می‌یابد [۱۸]. با وجود این در سال های اخیر مقالات متعددی در رابطه با امکان تهیه فوم های شیشه - سرامیک منتشر شده است [۴ و ۷-۸ و ۱۹]. شیشه - سرامیک‌های ارزان و با استحکام مکانیکی بالا مبتنی بر سیستم چهار تایی MgO-Al₂O₃-SiO₂-CaO می‌باشند. دایوپساید ،

هر یک از آمیزها پس از اختلاط، به مدت ۲ ساعت در درون بوتله زیرکنی و در دمای □ ۱۴۵۰ در کوره الکتریکی ذوب و مذاب حاصل در آب مقطر سرد شد. سپس فریت به دست آمده به مدت ۲ ساعت در هاون چینی الکتریکی آسیاب شد. توزیع اندازه ذرات

توسط شیشه با روش ssestile، در دمای ۱۲۰۰ °C به مدت ۱۵ دقیقه انجام شد. زاویه تماس θ با بزرگنمایی تصاویر سطح تماس اندازه گیری شد [۲۱]. کشش سطحی شیشه ها با استفاده از ضرایب جمع پذیر دیتزل و رابطه زیر محاسبه گردید [۲۲].

$$\gamma = \sum a_i X_i$$

که X_i درصد مولی هر اکسید و a_i ضریب کشش سطحی هر اکسید می باشد.

ویژگی های زیر ساختاری نمونه ها پس از سمپاده زنی، پولیش و اچ شیمیایی توسط محلول ۵٪ اسید فلئوریدریک به مدت ۱۵ ثانیه توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (Vega Tescan) بررسی شد. برای شناسایی و بررسی تشکیل فاز یا فازهای بلورین احتمالی از دستگاه پراشگر پرتو ایکس (Siemens-D-500) استفاده شد. بررسی رفتار حرارتی پودر شیشه و ذرات SiC با استفاده از دستگاه آنالیز حرارتی همزمان (NETZSCH 409) در دو اتمسفر مختلف هوا و آرگون با سرعت گرمایش ۱۰ °C/min انجام شد.

به عنوان عامل فومزا استفاده شد. پس از مخلوط کردن فریت های آسیاب شده با ۲٪ وزنی SiC در هاون برقی به مدت ۱۵ دقیقه، مخلوط های حاصله توسط پرس هیدرولیک تک محوره دستی، تحت فشار ۴۰ MPa شکل داده شدند. قطعات پرس شده قطر ۲۲mm و ضخامت ۶mm داشتند. بعد از خشک کردن قرص ها در دمای ۱۱۰ °C، پخت نمونه ها در محدوده دمایی ۱۰۰۰-۸۵۰ °C در کوره الکتریکی با سرعت گرمایش ۱۰ °C/min و یک ساعت ماندگاری در دمای بیشینه صورت گرفت. چگالی توده ای نمونه ها با اندازه گیری وزن و ابعاد آنها و دانسیته حقیقی آنها از طریق روش پیکنومتری تعیین شد. تخلخل کل (P) و فاکتور فوم دار شدن (α) نمونه های زینتر شده به ترتیب مطابق روابط زیر تعیین شدند:

$$\% P = (1 - d_b/d_r) \times 100$$

$$\alpha = (d_g - d_b)/d_g$$

که d_r و d_b به ترتیب چگالی توده ای و حقیقی نمونه زینتر شده حاوی عامل فوم زا و d_g چگالی توده ای نمونه زینتر شده عاری از عامل فوم زا می باشد. بررسی قابلیت تر شوندگی ذرات SiC

جدول (۲): آنالیز اکسیدی شیشه مینا و شیشه های تهیه شده حاوی اکسید سرب و بور (نسبت وزنی)

شیشه	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	PbO	B ₂ O ₃
F	۵۵/۰۵	۱۳/۶۱	۲۴/۴۲	۶/۹۲	۲/۸۲	۳/۰۲	-	-
FB5	۵۵/۰۵	۱۳/۶۱	۲۴/۴۲	۶/۹۲	۲/۸۲	۳/۰۲	-	۵
FB10	۵۵/۰۵	۱۳/۶۱	۲۴/۴۲	۶/۹۲	۲/۸۲	۳/۰۲	-	۱۰
FB15	۵۵/۰۵	۱۳/۶۱	۲۴/۴۲	۶/۹۲	۲/۸۲	۳/۰۲	-	۱۵
FP5	۵۵/۰۵	۱۳/۶۱	۲۴/۴۲	۶/۹۲	۲/۸۲	۳/۰۲	۵	-
FP10	۵۵/۰۵	۱۳/۶۱	۲۴/۴۲	۶/۹۲	۲/۸۲	۳/۰۲	۱۰	-
FP15	۵۵/۰۵	۱۳/۶۱	۲۴/۴۲	۶/۹۲	۲/۸۲	۳/۰۲	۱۵	-

همانطور که مشاهده می شود با افزایش اکسید بور دمای انتقال به شیشه، دمای پیک تبلور و همچنین ارتفاع پیک تبلور کاهش یافته و فاصله دمایی بین دمای شروع پیک تبلور و دمای انتقال به شیشه افزایش یافته است. به نظر می رسد B₂O₃ با کاهش گرانیوی شیشه تحرک یون ها را برای نفوذ آسان تر کرده و با کمک به کینتیک

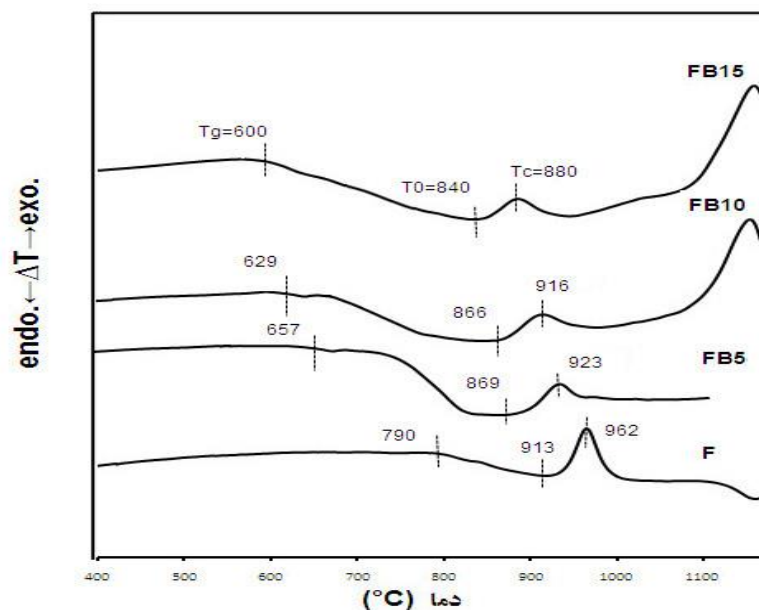
۳- نتایج و بحث

۳-۱- خواص حرارتی و فیزیکی فوم شیشه

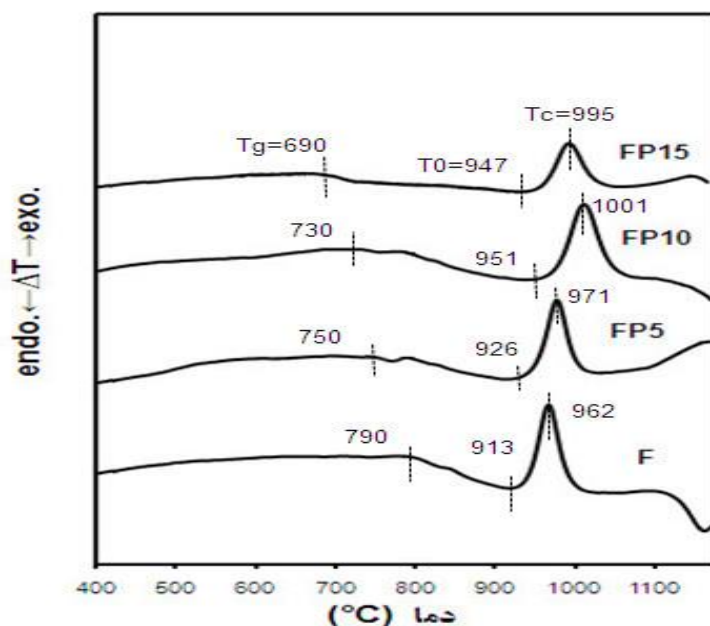
شکل های ۲ا و ۲ب الگوهای حاصل از آنالیز DTA شیشه های مورد بررسی را در اتمسفر هوا نشان می دهد. دمای شروع تبلور (T₀)، دمای پیک تبلور (T_c) به دست آمده از الگوی DTA در جدول ۳ نشان داده شده است.

نمونه‌های عملیات حرارتی شده در دمای 1000°C ، دایوپساید و ژهلیت فازهای بلورین متبلور شده در تمامی شیشه‌ها هستند. در شکل ۴ نتایج الگوهای پراش پرتو ایکس شیشه‌های حاوی ۱۵ درصد اکسید سرب در دماهای مختلف آورده شده است.

تبلور موجب کاهش دمای تبلور می‌شود. اما همانطوری که از شکل ۲ مشاهده می‌شود با افزایش مقدار اکسید سرب، دمای پیک تبلور افزایش یافته و از ارتفاع پیک‌ها کاسته شده است. این بدان معنا است که اکسید سرب باعث کاهش تمایل شیشه‌ها به تبلور می‌شود. مطابق نتایج الگوهای پراش پرتو ایکس (شکل ۳) در



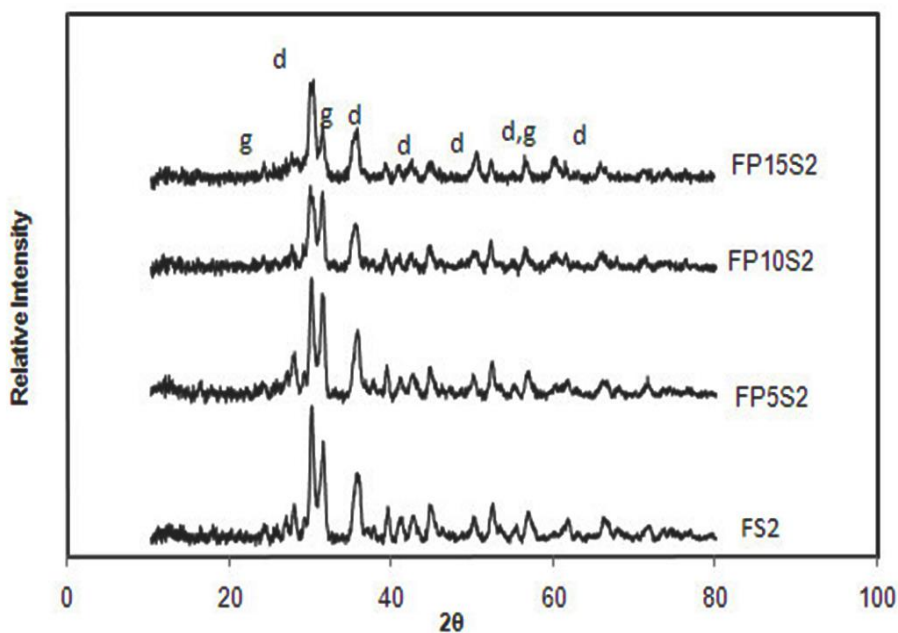
شکل (۱): گرمانگاشت DTA شیشه‌های حاوی مقادیر مختلف اکسید بور با سرعت گرمایش $10^\circ\text{C}/\text{min}$



شکل (۲): گرمانگاشت DTA شیشه‌های حاوی مقادیر مختلف اکسید سرب با سرعت گرمایش $10^\circ\text{C}/\text{min}$ در اتمسفر هوا

جدول (۳): دماهای مشخصه شیشه مینا و شیشه های حاوی مقادیر مختلف اکسید بور و سرب

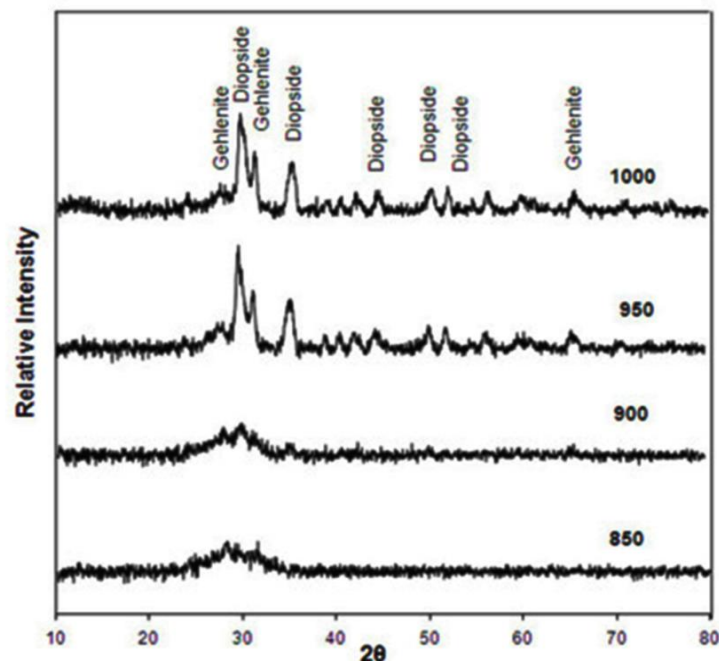
شیشه	T _g	T ₀	T _c	T ₀ -T _g
F	۷۹۰	۹۱۳	۹۶۲	۱۲۳
FB5	۶۵۷	۸۶۹	۹۲۳	۲۱۲
FB10	۶۲۹	۸۶۶	۹۱۶	۲۳۷
FB15	۶۰۰	۸۴۰	۸۸۰	۲۴۰
FP5	۷۵۰	۹۲۶	۹۷۱	۱۷۶
FP10	۷۳۰	۹۵۱	۱۰۰۱	۲۲۱
FP15	۶۹۰	۹۴۷	۹۹۵	۲۵۷



شکل (۳): الگوهای پراش پرتو ایکس نشان دهنده فازهای (دایوپساید: d، ژهلیت: g) تشکیل شده در شیشه های عملیات حرارتی شده در دمای □ ۱۰۰۰

بین □ ۱۰۰۰ - ۹۰۰ می رسد. این رفتار ذکر شده با نتایج نمودار تخلخل کل هم مطابقت دارد (شکل ۷).

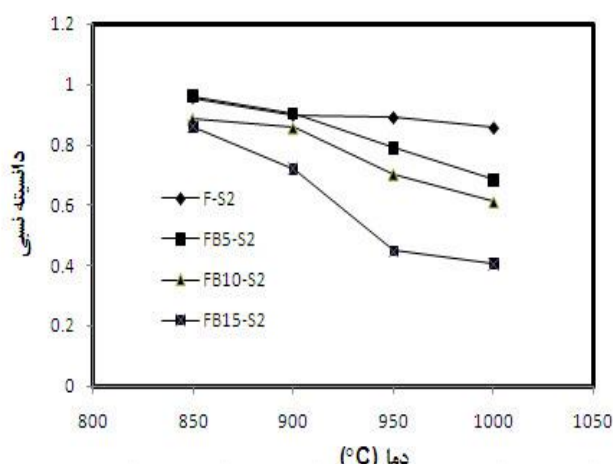
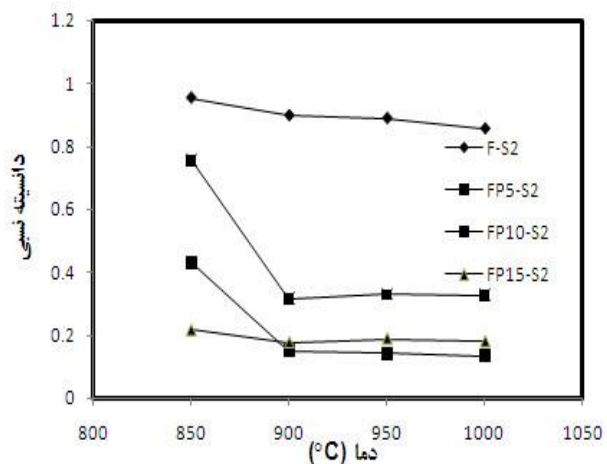
اشکال ۵، ۶ و ۷ به ترتیب نشان دهنده چگالی نسبی، فاکتور فوم دار شدن و تخلخل کل شیشه های محتوی ۲٪ وزنی SiC بعد از پخت در محدوده دمایی □ ۱۰۰۰ - ۸۵۰ هستند. مطابق اشکال ۵ و ۶، نمونه FS2 چگالی نسبی بالا و فاکتور فوم دار شدن کمی دارد که نمی تواند به عنوان یک ماده فوم تلقی شود. اما افزودن اکسید سرب، باعث تغییر قابل توجهی در چگالی نسبی و فاکتور فوم دار شدن شیشه ها می شود. از این رو چگالی نسبی نمونه FP10S2 با افزایش دما کاهش یافته و به کمترین مقدار خود در محدوده دمایی



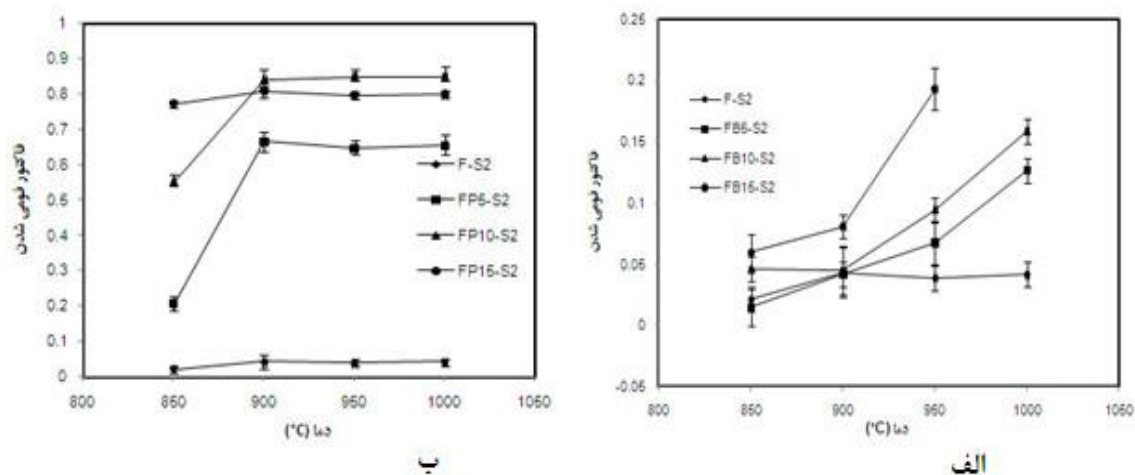
شکل (۴): الگوی پراش پرتو ایکس شیشه FP15 در دماهای مختلف

بین دمای شروع پیک تبلور و دمای انتقال به شیشه (T_0-T_g)، از قابلیت فومی شدن مطلوبی برخوردار نمی‌باشند. می‌توان نتیجه گرفت که قابلیت فوم‌دار شدن شیشه‌های حاوی اکسید سرب با کاهش شدت پیک تبلور فاز دایوپساید و در نتیجه تمایل به تبلور کم این شیشه‌ها همراه است (شکل‌های ۲ و ۳).

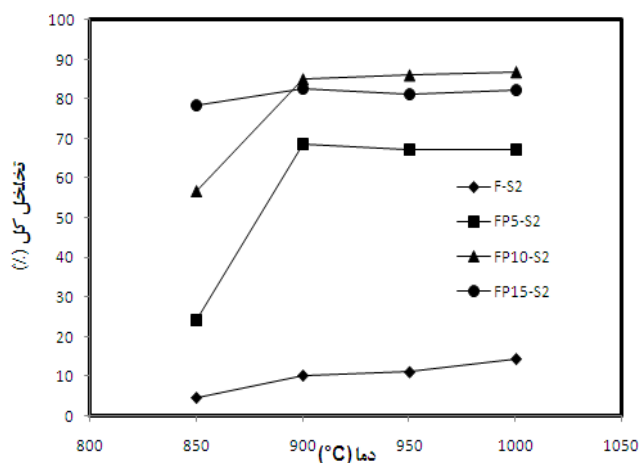
این مشخصه شیشه‌های اکسید سرب در نتایج تحقیقات قبلی [۲۳] نیز مشاهده شده است که باعث می‌شود شیشه با ذرات SiC واکنش کرده، باعث ایجاد گاز و در نتیجه فوم دار شدن نمونه‌ها شود. اما با توجه به شکل ۱ و نتایج جدول ۳، مشاهده می‌شود شیشه‌های حاوی اکسید بور علی‌رغم وسیع شدن محدوده دمایی



شکل (۵): چگالی نسبی شیشه‌های حاوی مقادیر مختلف: (الف): اکسید بور و (ب): اکسید سرب با حضور ۲ درصد وزنی SiC پس از پخت در دماهای مختلف به مدت یک ساعت



شکل (۶): فاکتور فومی شدن شیشه های حاوی مقادیر مختلف: (الف): اکسید بور و (ب): اکسید سرب پس از پخت در دماهای مختلف به مدت یک ساعت



شکل (۷): تغییرات تخلخل کل با دمای عملیات حرارتی

محاسبه گردید. بازبسته نوری به عنوان نیروی محرکه ای برای انجام واکنش شیمیایی بین سرامیکها و مذاب شیشه در نظر گرفته می شود [۲۴]. در جدول ۴ بازبسته نوری شیشه ها آورده شده است.

به منظور بررسی دقیق علت عدم فوم دار شدن شیشه های حاوی اکسید بور علی رغم وسیع شدن محدوده دمایی بین دمای شروع پیک تبلور و دمای انتقال به شیشه، پارامتر بازبسته نوری شیشه ها

جدول (۴): فاصله دمایی T₀-T_g، بازبسته نوری برای ترکیبات مورد بررسی

فاکتور فومی شدن در دمای □ ۹۵۰	بازبسته نوری	T ₀ -T _g	شیشه
۰/۰۳	۶۸/۴۹	۱۲۳	F
۰/۶۴	۶۸/۸۶	۱۷۶	FP5
۰/۸۵	۶۹/۲	۲۲۱	FP10
۰/۸	۶۹/۵	۲۵۷	FP15
۰/۰۶	۶۷/۳	۲۱۲	B5
۰/۰۹	۶۶/۲	۲۳۷	B10
۰/۱۹	۶۵/۲	۲۴۰	B15

عاری از SiC (FP15) و شیشه حاوی SiC (FP15S2) در دو اتمسفر هوا و آرگون مورد مقایسه و بررسی قرار گرفت. شکل ۸ نتایج این آزمایش را نشان می‌دهد. بررسی‌ها نشان داده است که اکسیداسیون SiC تا دمای 1400°C و بالاتر به ترتیب بر طبق واکنش‌های زیر می‌باشد [۲۶]:



با در نظر گرفتن واکنش‌های بالا می‌توان نتیجه گرفت که واکنش ۱ با افزایش وزن و واکنش ۲ با کاهش وزن همراه است.

بر طبق شکل ۸ در مورد ذرات SiC استفاده شده، افزایش وزن بسیار جزئی تا دمای 1200°C (در اتمسفر هوا) مشاهده می‌شود و در مورد شیشه FP15 تغییرات وزنی مشاهده نشده در حالی که در مورد شیشه FP15S2 کاهش وزن شدیدی در دمای بالاتر از 1000°C (در دو اتمسفر هوا و آرگون) مشاهده می‌شود که احتمالاً ناشی از واکنش زیر می‌باشد:

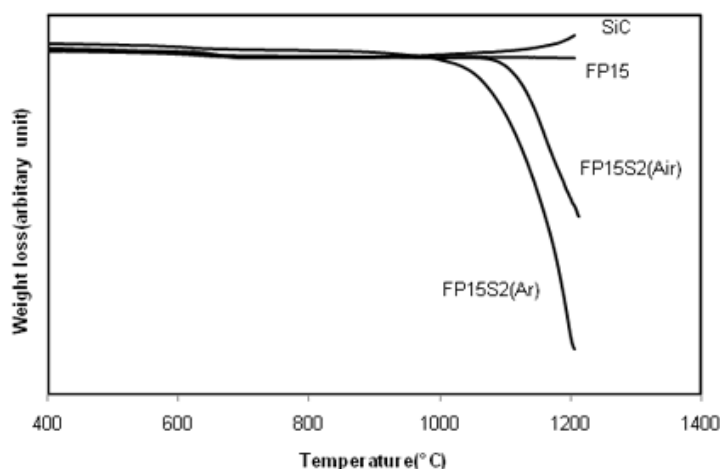


همانطور که از جدول مشاهده می‌شود با افزایش نسبت وزنی اکسید سرب، فاصله دمایی T_0-T_g وسیعتر شده و بازیسته نوری به علت حضور اکسید سرب با استحکام کمتر افزایش یافته است [۲۵] و فومی شدن به طور موفقیت آمیزی انجام شده است. در حالی که در مورد شیشه‌های حاوی اکسید بور علی‌رغم وسیعتر شدن فاصله دمایی T_0-T_g ، بازیسته نوری کاهش یافته و فومی شدن صورت نگرفته است. کاهش بازیسته نوری در این شیشه‌ها را می‌توان به الکترون‌گاتیویته بالای اکسید بور و در نتیجه استحکام اتصال بالای بین یون اکسیژن و بور و در نهایت قابلیت الکترون-دهی ضعیف این اکسید مربوط دانست.

۳-۲- فرایند فوم دار شدن شیشه های حاوی اکسید سرب

در یک بدنه فشرده حاوی ذرات SiC و شیشه، اکسیژن مورد نیاز برای فرایند فوم دار شدن از دو منبع مختلف تامین می‌شود:

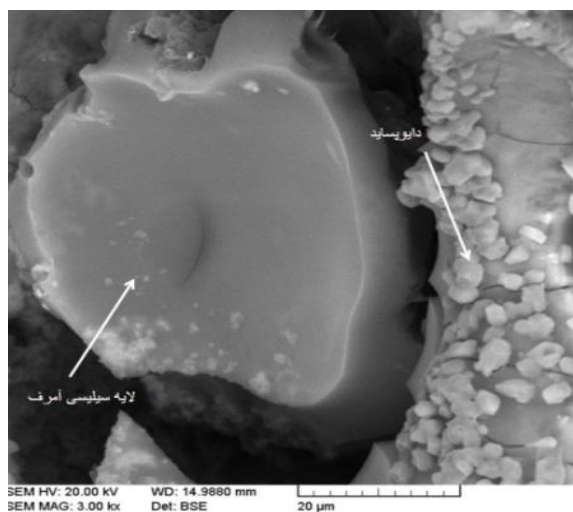
(۱) اکسیژن حل شده در شیشه، (۲) اکسیژن موجود در اتمسفر پخت [۱۸]. به منظور بررسی نقش هر کدام از این منابع در اکسید شدن SiC و در نهایت فومی شدن شیشه‌های حاوی اکسید سرب، گرمانگاشت‌های TG ذرات SiC مورد استفاده قرار گرفته، شیشه



شکل (۸): گرمانگاشت TG، پودر SiC، شیشه FP15 و نمونه FP15S2 در اتمسفرهای هوا و آرگون و سرعت گرمایش $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$

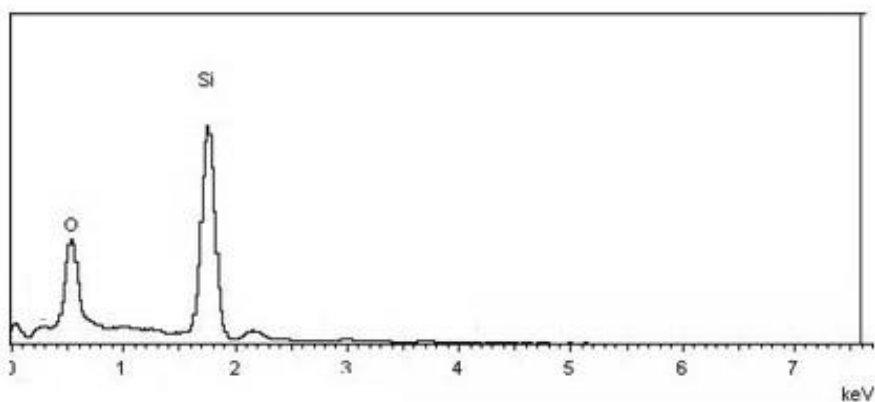
شیشه سیلیسی و بسکوز در اطراف ذرات SiC می‌باشد که باعث تاخیر در انجام واکنش ۳ شده است. تصویر SEM تهیه شده از

دمای بالاتر شروع کاهش وزن در نمونه مورد آزمایش قرار گرفته در اتمسفر هوا نسبت به اتمسفر آرگون احتمالاً به دلیل تشکیل لایه

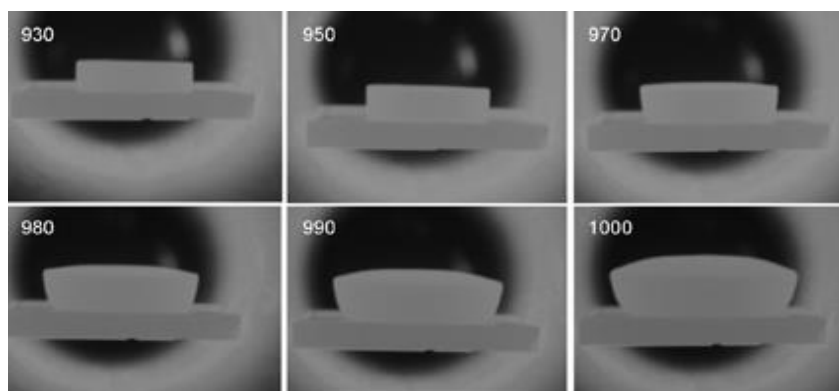


شکل (۹): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح ذره SiC

سطح ذره SiC (شکل ۹) به همراه آنالیز نقطه‌ای آن (شکل ۱۰) تشکیل لایه سیلیسی (احتمالاً آمرف) روی ذرات SiC را نشان می‌دهد. در شکل ۱۱ نمونه FP15S2 همان رفتار فوم‌دار شدن را با همان سرعت گرمایش در یک کوره تیوبی در اتمسفر اکسیدی نشان می‌دهد. مطابق این شکل فوم‌دار شدن در دمای ۹۷۰°C شروع می‌شود، اما با در نظر گرفتن گرمانگاشت TG مربوطه گاز ایجاد شده می‌بایستی در دمای بالاتری در حدود ۱۰۰۰°C از نمونه آزاد شود، زمانی که فشار گاز به اندازه‌ای است که می‌تواند دیواره حفرات بسته را باز کند.



شکل (۱۰): طیف EDS از سطح ذره SiC



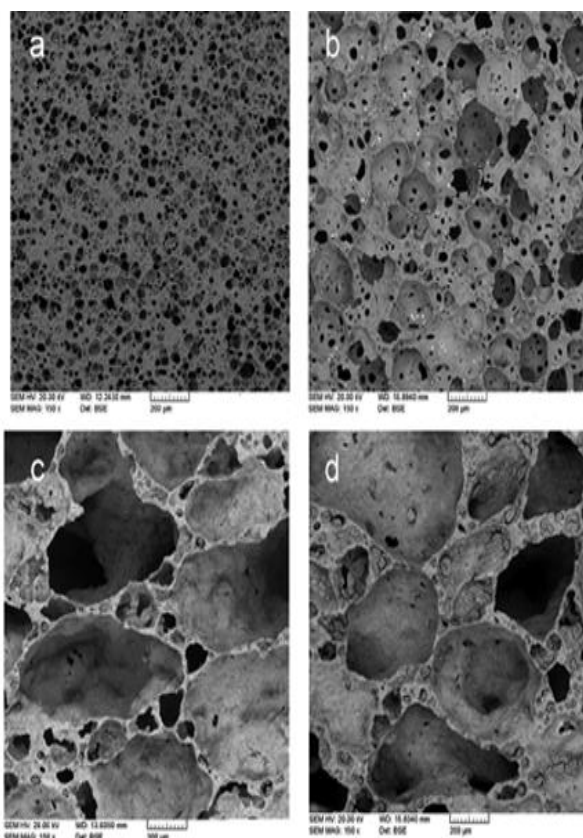
شکل (۱۱): رفتار فوم‌دار شدن شیشه FP15S2 در طی گرمایش در کوره تیوبی با سرعت گرمایش ۱۰ °C/min

تر شونده‌گی در فصل مشترک شیشه - کاربید سیلیسیم را نشان می‌دهد. کشش سطحی و یا زاویه تماس کم بیانگر سطح تماس زیاد بین شیشه-SiC بوده و در نتیجه احتمال انجام واکنش (۳)

نقش اکسید سرب در فوم‌دار شدن شیشه‌ها با اندازه‌گیری قابلیت ترشونده‌گی و کشش سطحی شیشه‌ها بطور دقیق مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل در جدول ۵ ارائه شده است. شکل ۱۲، زاویه

۳-۳- بررسی ریزساختاری

شکل ۱۳ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه FP10S2 را بعد از پخت در محدوده دمایی 850°C - 1000°C نشان می‌دهد. همانطوریکه مشاهده می‌شود، اندازه سلول‌ها با افزایش دما افزایش می‌یابد، که احتمالاً ناشی از افزایش فشار گاز و کاهش گرانروی شیشه با دما می‌باشد که منجر به بهم پیوستن حباب‌ها می‌شود، بدین معنی که برای کاهش انرژی سطحی سیستم، حباب‌های کوچکتر به نفع رشد حباب‌های بزرگتر از بین می‌روند [۱۳].



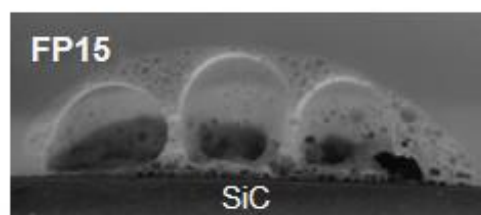
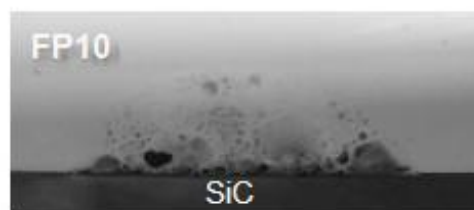
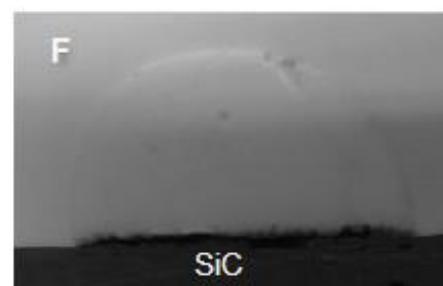
شکل (۱۳): تصویر میکروسکوپ الکترونی فوم شیشه - سرامیک FP15S2 در دماهای $T=1000^{\circ}\text{C}$ (d)، $T=950^{\circ}\text{C}$ (c)، $T=900^{\circ}\text{C}$ (b)، $T=850^{\circ}\text{C}$ (a).

شکل ۱۴ ریز ساختار نمونه FP15S2 را بعد از پخت در دمای 1000°C نشان می‌دهد، که بلورهای ریز دایوپساید و یا ژله‌ایت در زمینه شیشه‌ای دیواره حباب تشکیل شده‌اند.

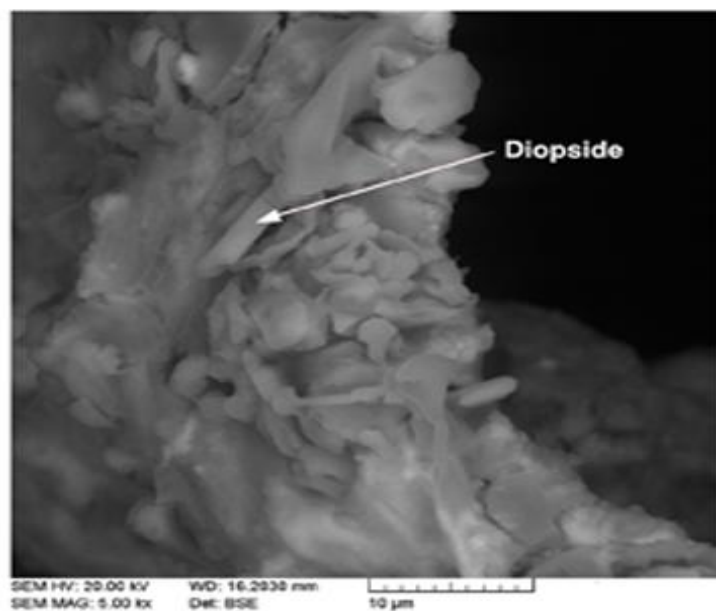
افزایش یافته و در نتیجه با توجه به شکل ۱۲ حباب‌های گاز در فصل مشترک شیشه‌های مذکور ایجاد شده است، در حالی که به علت عدم ترشدن کافی ذرات SiC توسط شیشه F واکنشی بین آنها صورت نگرفته است و حباب‌های گازی مشاهده نمی‌شود. نتایج اخیر به همراه تاثیر گداز آوری اکسید سرب در شیشه و تاثیر آن بر روی گرانروی شیشه لازمه پدیده بادکردگی می‌باشد.

جدول (۵): مقادیر کشش سطحی و زاویه ترشوندگی شیشه‌ها در 1200°C

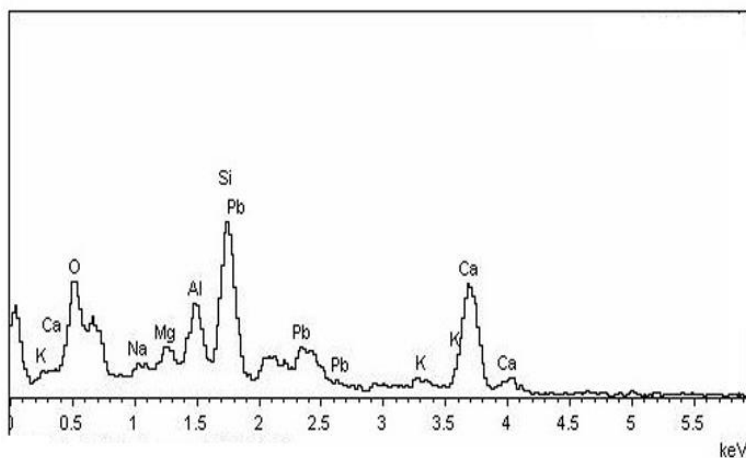
شیشه	کشش سطحی (dyn/cm)	زاویه ترشوندگی ($^{\circ}$)
F	۴۰۲/۷۵	۸۵
FP5	-	-
FP10	۳۷۷/۳	۶۰
FP15	۳۶۶/۱۶	۵۵



شکل (۱۲): تصاویر تهیه شده از زاویه ترشوندگی در فصل مشترک شیشه - کاربید سیلیسیم



شکل (۱۴): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از بلورهای دایوپساید تشکیل شده در زمینه شیشه‌ای دیواره حفره در فوم شیشه - سرامیک FP15S2



شکل (۱۵): طیف EDS از بلورهای میله ای شکل (دایوپساید)

۵- نتیجه گیری

۲- نتایج آزمایشات نشان داد که جاب‌های تشکیل شده در شیشه از طریق واکنش بین یون‌های اکسیژن موجود در ساختار شیشه و ذرات SiC ایجاد شده و به نوع اتمسفر بستگی ندارند که نتیجه این واکنش منجر به ایجاد شیشه - سرامیک هایی با چگالی توده - ای ۰/۵ می‌شود.

۳- فاکتور فوم دار شدن فوم شیشه - سرامیک P10-S2 با مقدار تخلخل کل ۸۵ درصد و چگالی نسبی ۰/۱۴، برابر با ۰/۸۵ بود.

۱- اکسید سرب جز لازمی برای بهبود رفتار فوم دار شدن شیشه - سرامیک دایوپسایدی می‌باشد. بهبود قابلیت فوم دار شدن شیشه در نتیجه: (۱) انتقال دمای پیک تبلور به دماهای بالاتر، (۲) کاهش شدت پیک تبلور در نمودار DTA، (۳) کاهش زاویه تماس شیشه ناشی از کاهش گرانروی و کشش سطحی شیشه و (۴) افزایش بازیسته نوری می‌باشد.

۶- مراجع

- [12] F. Mear, P. Yot, R. Viennois & M. Ribes, "Mechanical behavior and thermal and electrical properties of foam glass", *Ceram. Int.*, Vol. 33, pp. 543-550, 2007.
- [13] E. Bernardo & F. Albertini, "Glass foams from dismantled cathode ray tubes", *Ceram. Int.*, Vol. 32 pp. 603-608, 2006.
- [14] F. Mear, P. Yot, M. Cambon & M. Ribes, "Elaboration and characterization of foam glass from cathode ray tubes", *Adv. Appl. Ceram.*, Vol. 104, pp. 123-130, 2005.
- [15] م. سعیدی حیدری، س. عباسی و م. میر کاظمی، "مقایسه اثر دما و میزان سیلیکون کاربرد بر خواص و ریزساختار شیشه های اسفنجی حاصل از ضایعات شیشه سودالایم و شیشه پاتل تلویزیون"، فصلنامه علمی و پژوهشی فرایندهای نوین در مهندسی مواد، سال ششم، شماره ۴، ۱۳۹۱.
- [16] B. Xu, K. M. Liang, J. W. Cao & Y. H. Li, "Preparation of Foam Glass Ceramics from Phosphorus Slag", *Advanced Materials Research*, Vol. 105-106, pp. 600-603, 2010.
- [17] H. R. Fernandes, D. U. Tulyaganov & J. M. F. Ferreira, "Preparation and characterization of foams from sheet glass and fly ash using carbonates as foaming agents", *Ceram. Int.*, Vol. 35, pp. 229-235, 2009.
- [18] Steiner & A. Christian, "Foam Glass Production from vitrified Municipal Waste Fly Ashes", Doctoral Thesis, Technische Universiteit Eindhoven, Dusseldorf, 2006.
- [19] J. P. Wu, A. R. Boccaccini, P. D. Lee, M. J. Kershaw & R. D. Rawlings, "Glass-ceramic foams from coal ash and waste glass: production and characterization", *Adv. Appl. Ceram.*, Vol. 105, pp. 32-39, 2006.
- [20] M. Rezvani, B. Eftekhari-Yekta, M. Solati-Hashjin & V. K. Marghussian, "Effect of Cr₂O₃, Fe₂O₃ and TiO₂ nucleants on the crystallization behavior of SiO₂-Al₂O₃-CaO-MgO(R₂O) glass-ceramics", *Ceram. Int.*, Vol. 31, pp. 75-80, 2005.
- [21] P. C. Hiementz, "Principals of Colloid and Surface Chemistry", Marcel Dekker, Inc., New York, 1977.
- [22] Frederick T. Walleberger, "Fiber glass and glass technology", Springer New York, 2010.
- [1] G. Scarini, G. Brusatin & E. Bernardo, "Production Technology of Glass Foams, in: M. Scheffler, P. Colombo (Eds.), Cellular Ceramics. Structure, Manufacturing", Properties and Applications, Wiley-VCH, Weinheim, Germany, 2005.
- [2] W. O. Lytle, Pittsburgh Plate Glass, USA, US Patent, Vol. 2, pp. 215 - 223, 1940.
- [3] E. Bernardo, R. Cedro, M. Florean & S. Hreglich, "Reutilization and stabilization of wastes by the production of glass foams", *Ceram. Int.*, Vol. 33 pp. 963-968, 2007.
- [4] E. Bernardo & G. Scarinci, "Recycling of waste glasses into partially crystallized glass foams", *J. Porous. Mater.*, Vol. 17, pp. 359-365, 2010.
- [5] A. Saburit Llaudis, M. Jose Orts Tari, F. Javier Garcia Ten, E. Bernardo & P. Colombo, "Foaming of flat glass cullet using Si₃N₄ and MnO₂ powders", *Ceram. Int.*, Vol. 35, pp. 1953-1959, 2009.
- [6] D. U. Tulyaganov, H. R. Fernandes, S. Agathopoulos & J. M. F. Ferreira, "Preparation and characterization of high compressive strength foams from sheet glass", *J. Porous. Mater.*, Vol. 13, pp. 133-139, 2006.
- [7] H. W. Gue, Y. X. Gong & S. Y. Gao, "Preparation of high strength foam glass-ceramics from waste cathode ray tube", *Mater. Lett.*, Vol. 64, pp. 997-999, 2010.
- [8] E. Bernardo, "Micro- and macro-cellular sintered glass-ceramics from wastes", *J. Eur. Cer. Soc.*, Vol. 27, pp. 2415-2422, 2007.
- [9] E. Bernardo, G. Scarinci & S. Hreglich, "Foam glass as a way of recycling glasses from cathode ray tubes", *Glass Sci. Technol.*, Vol. 78, pp. 7-11, 2005.
- [10] F. Mear, P. Yot, M. Cambon, R. Caplian & M. Ribes, "Characterization of porous glasses prepared from Cathode Ray Tube (CRT)", *Powder Technology*, Vol. 162, pp. 59-63, 2006.
- [11] F. Mear, P. Yot & M. Ribes, "Effects of temperature, reaction time and reducing agent content on the synthesis of macroporous foam glasses from waste funnel glasses", *Mater. Lett.*, Vol. 60, pp. 929-934, 2006.

- [23] B. Eftekhari-Yekta & V. K. Marghossian, "Effect of P_2O_5 , B_2O_3 and PbO on the sintering of quartz solid solution and gahnite glass-ceramics", J. Eur. Cer. Soc, Vol. 36, pp. 477-483, 2001.
- [24] M. B. Volf, "Chemical approach to glass", Elsevier, Amsterdam-Oxford-New York, 1984.
- [25] Arun K. Varshneya, "Fundamentals of Inorganic Glasses", Academic press, INC. 1993.
- [26] M. Village, T. Sierra, F. Lucas, J. F. Fernandez & A. C. Caballero, "Oxidation treatments for SiC particles and its compatibility with glass", J. Eur. Cer. Soc, Vol. 27, pp. 861-865, 2007.