

ساخت شیشه سیلیس ذوبی اپتیکی مورد استفاده در فضاپیماها و ماهواره ها با استفاده از فرایند

تفجوشی پلاسمای جرقه ای (SPS)

سیدسلیمان سیدافقهی^{1*}، فرشاد سلیمانی²، پوریا دهقانی³

1- دانشیار و مدیر گروه مهندسی مواد دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران-اتوبان بابایی، salmanafghahi@gmail.com

2- استادیار و عضو هیئت علمی گروه مهندسی مواد دانشگاه ملایر، همدان-ملایر، f.soleimany@yahoo.com

3- دانشجو دکتری و پژوهشگر گروه مهندسی مواد دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران-اتوبان بابایی، p.dehghani@ihu.ac.ir

*سیدسلیمان سیدافقهی

چکیده

ماهواره در صنعت هوافضا، شیشه ها نقش مهمی را ایفا کرده اند، از جمله کاربردهای آنان استفاده در ژيروسکوپ های بسیار دقیق نیمه کروی (HRG)، لنزهای تلسکوپ های فضایی نظیر هابل و پنجره های فضاپیماها است. شیشه های سیلیس ذوبی قطعاتی کاربردی با شوک پذیری حرارتی و شفافیت در مقابل امواج الکترومغناطیس بالا می باشند. استفاده از شیشه های سیلیس ذوبی همواره با دو چالش بزرگ دمای بالای مورد نیاز برای ساخت این شیشه ها با مواد اولیه فوق خالص و استحکام مکانیکی پایین در آنها بوده است. در این پژوهش با انتخاب فرآیندی مدرن به نام تفجوشی پلاسمای جرقه ای¹ (SPS) که فرایند تفجوشی و شکلدهی قطعات را بایکدیگر انجام می دهد، نوآوری در زمینه ساخت شیشه های شفاف با بالاترین استحکام اتفاق افتاده است. بدین منظور نمونه ها در چهار دمای ۹۰۰، ۱۱۰۰، ۱۳۰۰ و ۱۵۰۰ درجه سانتی گراد تحت فشار ۵۰ مگاپاسکال تفجوشی شده اند. در این پژوهش نمونه های تولید شده با توجه به فاکتور تبلور فاز کریستوبالیت مورد آزمایش قرار گرفته و اثر این فاز مضر بر روی خواص تبیین شد. نمونه های حاصل تحت آزمون چگالی سنجی، تصویر برداری با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی، آزمون استحکام سنجی خمشی و پراش اشعه ایکس (XRD) قرار گرفته و پس از بررسی ها نمونه با کد FS13 با بیشترین مقدار گذردهی نور و استحکام مکانیکی بالا (۴۸.۷ مگاپاسکال) به عنوان نمونه بهینه مورد انتخاب قرار گرفت.

واژه های کلیدی: سیلیس ذوبی - تفجوشی پلاسمای جرقه ای - شیشه های اپتیکی

۱- مقدمه

موضوع انتخاب ماده در صنایع هوافضا، موضوعی بسیار مهم است که باید دقت زیادی بر روی آن انجام داد، بسیاری از فعالیت هایی که فضاپیماها و ماهواره ها در فضا انجام می دهند نیاز به استفاده از جدیدترین تکنولوژی ها در ساخت مواد تشکیل دهنده آن دارد و دلیل آن هم نیاز به تاب آوری این سازه های فضایی از لحظه اولیه پرتاب موشک حمل کننده تا تزریق و قرارگیری در مدار مربوطه است [2]، [1]. تاب آوری در مقابل اثر سرعت های هایپرسونیک و یا تجهیزات لیزری با توان بالا، مقاومت در برابر ضربه های مکانیکی که ممکن است بر روی تجهیزات اپتیکی و یا پنل های خورشیدی

و یا تجهیزات الکترونیکی فضاپیماها به علت برخورد زباله های فضایی یا شهاب سنگ های کوچک اتفاق بی افتد از دیگر پارامترهای مهمی است که برای سازه های هوافضایی مورد توجه قرار می گیرد. بارزترین ویژگی هایی ساختاری مواد پیشرفته مورد استفاده در این سازه ها با توجه به پارامترهای تاثیرگذار گفته شده شوک پذیری حرارتی بالا، مقاومت در برابر ضربه، وزن کم و ضریب اطمینان بالای این مواد را نام برد که نقش بسزایی بر افزایش طول عمر یک سیستم فضاپیماها ایفا می کنند [5]-[3].

در صنعت هوافضا، از سیلیس ذوبی عمدتاً برای ساخت سازه های شفاف به امواج مخابراتی استفاده می شود که از جمله آنها می توان به رادوم ها و پنجره های شفاف الکترومغناطیسی و اپتیکی اشاره کرد. با توسعه این بخش استفاده از سیلیس ذوبی به صورت شیشه به عنوان رادوم ها با تمرکز بر بهبود انتقال امواج و افزایش استحکام مکانیکی، شیشه های اپتیکی با تمرکز بر بهبود استحکام مکانیکی انجام شد [7]، [6].

۱-۱- معرفی خواص و ساخت شیشه های سیلیس ذوبی

در صنعت هوافضا، از سیلیس ذوبی عمدتاً برای ساخت سازه های شفاف به امواج مخابراتی استفاده می شود که از جمله آنها می توان به رادوم ها و پنجره های شفاف الکترومغناطیسی و اپتیکی اشاره کرد. با توسعه این بخش استفاده از سیلیس ذوبی به صورت شیشه به عنوان رادوم ها با تمرکز بر بهبود انتقال امواج و افزایش استحکام مکانیکی، شیشه های اپتیکی با تمرکز بر بهبود استحکام مکانیکی انجام شد [8].

شیشه ها خواص منحصر به فردی دارند، از بارزترین این ویژگی های، خواص اپتیکی آنها است که در محدوده بینایی انسان دارای بیشترین میزان شفافیت است. برای دست یابی به شفافیت های بالاتر در پنجره های اپتیکی، خلوص بالا به همراه قطعه ای عاری از هرگونه حباب و ریز ترک مورد نیاز است.

شیشه های سیلیس ذوبی به دلیل ضریب انبساط حرارتی بسیار پایین $5 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$ ، انتقال امواج در محدوده فرکانسی باند ایکس، مقاومت شیمیایی مناسب و استحکام مکانیکی خوب در دماهای بالا بسیار در صنعت هوافضا مورد توجه قرار گرفته اند [9]. نکته حائز اهمیت در ساخت این نوع از شیشه ها توجه ویژه به خلوص پودر اولیه و فرایند تولید آن است، فرایند تولید این شیشه ها بسیار پیچیده و حساس است بدین صورت که تغییرات دمایی با گرادبان زیاد و یا وجود هرگونه ناخالصی از جمله کربن در سیکل

² Radome

¹ Spark Plasma Sintering

$$\sigma = 3FL/2bd^2 \quad (1)$$

در این رابطه σ ، استحکام خمشی و یا سه نقطه‌ای بر حسب مگاپاسکال، F ، حداکثر نیروی اعمالی در لحظه شکست نمونه بر حسب نیوتن، L ، فاصله بین دو سر تحت فشار در نمونه بر حسب میلی‌متر، b ، عرض نمونه بر حسب میلی‌متر و d ، ارتفاع نمونه بر حسب میلی‌متر است.

جدول ترکیب شیمیایی و میزان خلوص ماده اولیه.

ترکیب شیمیایی	خلوص %
SiO ₂	۹۹.۹
Fe ₂ O ₃	۵۰ppm
Al ₂ O ₃	۱۰۰ppm
K ₂ O	۴۰ppm

تف‌جوشی نمونه‌ها به وسیله دستگاه تفت جوشی پلاسما جرقه ای (SPS) ساخت Easy Fashion-China انجام شد، در این فرایند دو فک وجود دارد که فک‌ها به صورت تک محور بر قالب از جنس گرافیت فشار آورده و پودر داخل قالب پرس می‌شود، در این فرایند پس از پرس اولیه پودر جریان الکتریسته انتقال پیدا کرده و به واسطه جرقه و پدیده پلاسما شاهد تف‌جوشی پودر و ایجاد قطعه بالک است، در این فرایند از قالب‌های استوانه ای گرافیتی استفاده شد (به‌منظور درک بهتر فرایند مشاهده شود). همچنین برای جلوگیری از نفوذ کربن به درون پودر از کاغذهای گرافیتی ایزوله کننده پودر استفاده شد، تف‌جوشی بازه دمایی ۹۰۰-۱۵۰۰ °C با نرخ حرارت‌دهی ۱۰۰ °C/min و مدت نگهداری در بیشینه دما ۱۵ دقیقه با فشار ۵۰MPa، در یک اتمسفر خلأ (10⁻² Torr) و تحت جریان الکتریکی مستقیم با میزان 7 A/mm² انجام شد، در نهایت قطعات تف‌جوشی شده به شکل قرص‌های با قطر ۳۰ میلی‌متر ساخته شدند که پس از فرایند پولیش زنی برای حذف گرافیت نفوذ کرده بر روی سطح آنها استفاده شد.

مطالعات تغییرات فازی شیشه‌های تولید شده به وسیله آزمون تفرق اشعه ایکس (XRD; Philips Xpert MPD Co/Cu K α & $\lambda=1.5406$ Å) انجام گرفته است، همچنین ریزساختار قطعات تولیدی نیز به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی (FE-SEM; TESCAN MIRA3) انجام گرفته است.

فرایند تف‌جوشی باعث افت بحرانی خواص و ویژگی این شیشه‌ها می‌شود. خلوص این شیشه‌ها برای کاربردهای مخابراتی و اپتیکی باید در محدوده SiO₂ >99.98% باشد که اصطلاحاً به آن شیشه‌های فوق خالص^۳ گفته می‌شود [10], [11].

فرایند سنتز و شکلدهی سیلیس ذوبی به دو روش کلی انجام می‌پذیرد، یا به صورت فرآیندهای مکانیکی می‌باشند و یا شکلدهی داغ. در فرایند مکانیکی پودر اولیه به صورت دوغاب سرامیکی (FSSC^۴) در آمده و شکلدهی می‌شوند، همچنین استفاده از پرس‌های ایزواستاتیک سرد (CIP^۵) نیز در این روش‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. از سوی دیگر استفاده از شکلدهی داغ (HF^۶) دارای مزیت‌های زیادی است از جمله بهینه سازی خواص با کاستن از تعداد مراحل فرایند شکل دهی و تف‌جوشی، از جمله روش‌های داغ شکلدهی شیشه‌های سیلیس ذوبی می‌توان به پرس داغ^۷، تف‌جوشی به روش پلاسما جرقه ای^۸ و ذوب ریزی اشاره کرد [8], [12].

روش تف‌جوشی پلاسما جرقه ای (SPS) یکی از روش‌های جدید در ساخت سرامیک‌های پیشرفته در دماهای زینترینگ پایین است [13]. این روش بر اساس تف‌جوشی پودر جامد توسط فشار تک محوری و جریان مستقیم پالسی (DC) است. مهمترین ویژگی SPS فرایند پخت سریع، ایمنی خوب، قابلیت تکرارپذیری و اطمینان بالا، تف‌جوشی یکنواخت، رشد دانه کم و ترکیب مراحل تراکم و تف‌جوشی در یک عملیات است [14]- [16]. علاوه بر این، SPS خلوص سازی و فعال سازی بهتر سطوح ذرات پودر، راندمان انرژی بالا، عملیات پخت بدون بایندر و عملیات تفت جوشی راحتی را ارائه می‌دهد [17]-[20].

هدف از انجام این پژوهش ساخت شیشه از جنس سیلیسی ذوبی با شفافیت و خواص مکانیکی مطلوب است. در این راستا بررسی فرایند تولید شیشه‌ها با استفاده از روش SPS که بیشترین چگالی پس از تف‌جوشی را با کمترین میزان عیوب در قطعه شیشه ای فراهم می‌کند، مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مواد و روش تحقیق

در این پژوهش از پودر سیلیس ذوبی فوق خالص < 99.99% تهیه شده از شرکت Shishan International Trade واقع در کشور چین، تهیه شد. جدول ۱ نشان دهنده ترکیب شیمیایی ماده اولیه مصرفی است. اندازه ذرات به وسیله آزمون PSA مورد بررسی قرار گرفت و میانگین ذرات برابر ۷۰ میکرومتر (D₅₀=70 μ m) برآورد شد. بمنظور بررسی چگالی بالک (ρ) نسبت به چگالی تئوری ($\rho_{th} = 2.2 \text{ g/cm}^3$) از روش چگالی سنجی ارشمیدس مطابق استاندارد ASTM D792 استفاده شد. آزمون استحکام خمشی طبق استاندارد ASTM-C1161-13 با استفاده از دستگاه استحکام فشاری SANTAM مدل "STM-20" انجام شد. اگرچه دستگاه اندازه گیری تست استحکام، استحکام سه نقطه‌ای را پس از انجام تست گزارش می‌کند، اما با توجه به تعداد محدود نمونه‌ها و همچنین جهت افزایش ضریب اطمینان، پس از آنالیز، از فرمول ۱ استحکام سه نقطه‌ای محاسبه شد:

^۶ Hot Forming

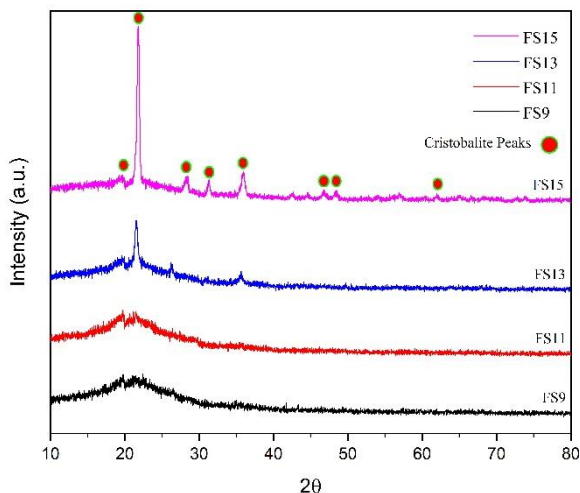
^۷ Hot Press

^۸ Spark Plasma Sintering

^۳ Hyper Pure

^۴ Fused Silica Slip Casting

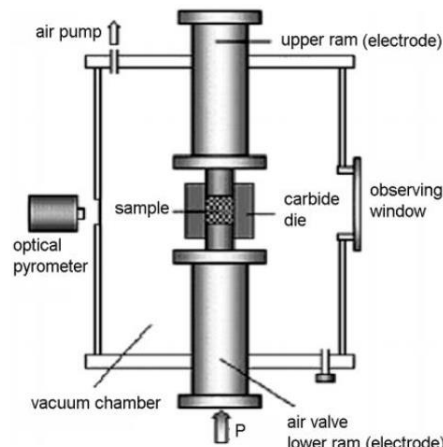
^۵ Cold isostatic Press



شکل ۳ پراش اشعه ایکس نمونه های شیشه در دماهای مختلف.

شکل ۴ نشان دهنده تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی است که روند رو به کاهشی تخلخل های نمونه ها در آن قابل مشاهده است. از نمونه FS9 الی FS15 به صورت تصاعدی این کاهش اتفاق افتاده است. به صورت کلی دستیابی به یک فاز شیشه ای عاری از هرگونه تخلخل و حفره بسیار مطلوب است، زیر حفرات تاثیر بسزایی بر کاهش خاصیت های ایتیکی و مکانیکی قطعات تولید شده دارند. وجود فشار همزمان با دما از نقاط کلیدی فرایند SPS است، در این حین همانطور که مشخص است با افزایش دما فاز شیشه ای و سیال که حاصل از ذوب جزئی و سطحی ذرات است به وجود می آید، اعمال فشار از ابتدای فرایند نیز کمک به نفوذ هرچه بیشتر این فاز مایع در مابین دانه های جامد و ذوب شدگی سطحی آنها و بهبود چگالی قطعات تولیدی شده است. در نهایت در دماهای بالاتر از ۱۳۰۰ درجه سانتی گراد از جمله در نمونه های FS13 و FS15 فرایند ذوب بین دانه ای و در ادامه تمام دانه ای و در انتها تشکیل شیشه اتفاق افتاده است.

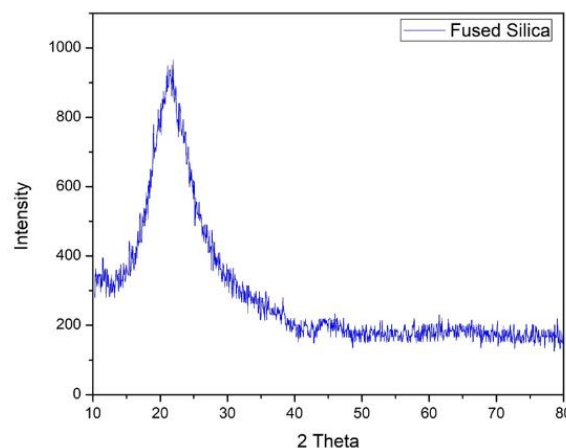
با استفاده از آزمون پراش اشعه ایکس مشخص شده در شکل ۳ مشخص شده که در زاویه $2\theta=21.5^\circ$ ، زاویه اصلی تبلور فاز کریستوبالیت است، بیشترین رشد فاز نیز در این زاویه اتفاق افتاده است، پس از آن $2\theta=38^\circ$ و زوایای $2\theta=31^\circ$ و $2\theta=28^\circ$ زوایای دیگر با بیشترین شدت پیک کریستوبالیتی است.



شکل ۱ سازوکار فرایند تفجوشی پلاسما جرقه ای [21].

۳- نتایج و بحث

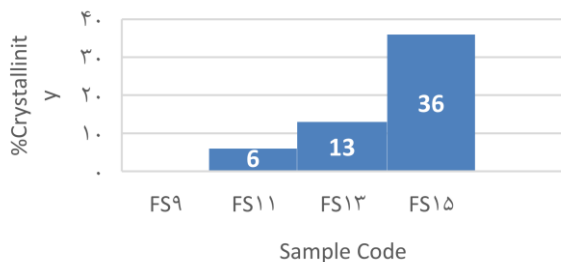
در ابتدا به بررسی فازهای تشکیل شده در سیلیس ذوبی پرداخته شده است، همانطور که در شکل ۲ قابل مشاهده است هیچ گونه فازی تشخیص داده نشده است. پراش اشعه ایکس گواهی بر آمورف بودن پودر اولیه خریداری شده و مبنای بررسی میزان بلورینگی در قطعات تفجوشی شده است.



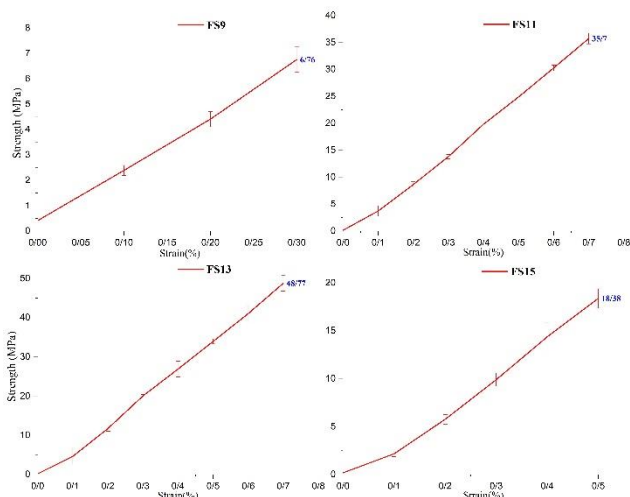
شکل ۲ پراش اشعه ایکس از پودر اولیه سیلیس ذوبی.

شکل ۳ نشان دهنده اعمال حرارت به منظور تفجوشی قطعات است، در حین انجام فرایند تفجوشی تبلور فاز کریستوبالیت از فاز اکثریت که بی شکل است، انجام شده. همانطور که در فرایند مشخص شده است، با افزایش دما پیک های کریستوبالیت افزایش پیدا کرده است. بطور کلی فازهای کریستوبالیت در دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی گراد شروع به تبلور شدن کرده و در دمای ۱۳۰۰ درجه سانتی گراد با شدت بیشتری این عمل شدت گرفته است [22]. همانطور که در شکل ۳ مشخص شده است، نمونه FS15 به دلیل فشار بالا و دمای ۱۵۰۰ درجه سانتی گراد حاوی مقدار زیادی از فاز کریستوبالیت رشد یافته است و قطعه شیشه ای حاصله از حالت آمورف به بلورینه تبدیل شده است.

در هنگام سرمایش که باعث ایجاد و اشاعه ریز ترک ها می شوند، گسترش و رشد این ریز ترک ها در نهایت باعث کاهش استحکام مکانیکی این دسته از مواد می شوند. شکل ۶ نشان دهنده میزان بلورینگی محاسبه شده برای نمونه های مختلف است، همانطور که مشخص است، افزایش دما باعث رشد میزان بلورینگی در نمونه ها شده است و این میزان رشد برخلاف روند خطی به صورت تصاعدی در دماهای بالاتر رشد افراطی را پیدا کرده است.

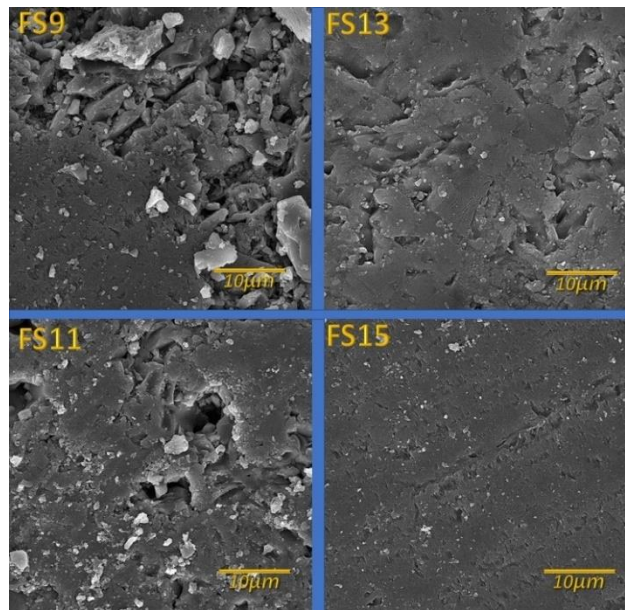


شکل ۶ میزان بلورینگی محاسبه شده در نمونه های مختلف.



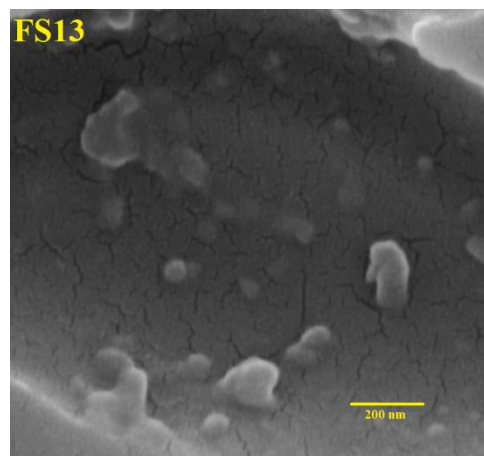
شکل ۷ جداول آزمون استحکام مکانیکی نمونه ها.

شکل ۷ نشان دهنده استحکام مکانیکی قطعات تولید شده است، همانطور که مشخص است با افزایش دما خواص مکانیکی نمونه ها بهبود یافته است (تا قبل از نمونه FS15). این بهبود خواص مکانیکی رابطه مستقیمی با دما دارد، بدین صورت که با افزایش دما شاهد متراکم شدن هرچه بیشتر که بر اثر ذوب شدگی سطحی و در نمونه FS13 که با ذوب شدن تمام ذرات و تبدیل شدن به شیشه است. بیشینه مقدار استحکام حاصل شده برابر ۴۸.۷۷ مگاپاسکال بوده است، نمونه ای که کاملاً شیشه ای و شفاف شده است و به بیشینه مقدار چگالی خود دست پیدا کرده است. با افزایش دما به ۱۵۰۰ درجه سانتی گراد شاهد رشد افراطی فاز کریستوبالیت می باشیم. ریز ترک های حاصل از این فاز با افزایش دما رشد کرده و در نهایت باعث کاهش بسیار زیاد استحکام شده است، کاهش اساسی این استحکام به قدری بوده است که آماده سازی نمونه را نیز با مشکل مواجه کرده و عملاً مشخص شد که دمای ۱۵۰۰ درجه سانتی گراد، دمای



شکل ۴ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از شیشه های SPS شده در دماهای مختلف.

شکل ۵ نشان دهنده بزرگنمایی با مقیاس بالا از نمونه های میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه F13 است که دمای سینترینگ آن ۱۳۰۰ درجه سانتی گراد بوده است، همانطور که توضیح داده شد با افزایش دما، مقدار فاز کریستوبالیت رشد پیدا کرده است. ریز ترک های قابل مشاهده در شکل ۵ نیز گواه از این موضوع است که با تغییر فاز از آمورف به کریستوبالیت و به دلیل تغییرات حجمی این تغییرات به صورت ریز ترک بروز کرده اند. بروز اینگونه ریز ترک ها باعث افت بسیار شدید استحکام مکانیکی در قطعات شده است.



شکل ۵ تصویر میکروسکوپ الکترونی از نمونه FS13 تفجوشی شده در دمای ۱۳۰۰ درجه سانتی گراد در بزرگ نمایی بالا.

جنبه دیگر اثر دما بر روی اندازه بلورها است که باعث شکل گیری یک مجموع بلور در کنار هم می شود و هسته زایی و جوانه زنی بلورها از همین نقاط شروع شده و به صورت یک کلونی رشد پیدا می کنند. به نظر می رسد به دلیل رشد کلونی بلورها در کنار یکدیگر و تغییر حجم این بلورها

همانطور که مشخص است نمونه های تفجوشی شده در دمای ۱۳۰۰ و ۱۵۰۰ درجه سانتی گراد قرار گرفته شده و نمونه FS13 و FS15 شفاف شده اند، اما همانطور که گفته شد نمونه FS15 از استحکام کافی برخوردار نبوده است و حجم زیادی از ریزترک ها در آن وجود داشته است. نمونه FS13 که در دمای ۱۳۰۰ درجه سانتی گراد تفجوشی شده است، شفافیت و استحکام مکانیکی مناسبی داشته و پس از پرداخت و عملیات پولیشینگ و کربن زدایی از شفافیت خوبی برخوردار شده است.

۴- نتیجه گیری

در این فرایند به بررسی ساخت شیشه هایی از جنس سیلیس ذوبی پرداخته شده است، بدین منظور از فرایند سینترینگ پلاسما جرقه ای استفاده شده است. محدوده تفجوشی در بازه ۹۰۰ الی ۱۵۰۰ درجه سانتی گراد انتخاب شد و فشار نیز برابر ۵۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شد. پس از بررسی های انجام گرفته مشخص شد فاز تبلور یافته کریستوبالیت که بلورینگی فاز مذکور رابطه مستقیمی با افزایش دما دارد، نقش مهمی را در خواص مکانیکی شیشه تولید شده ایفا می کند. در این بین نمونه با کد FS13 با مقدار بلورینگی ۱۳٪ به عنوان نمونه بهینه انتخاب شد، بلورینگی کم و دمای تفجوشی مناسب باعث پدید آمدن یک شیشه با حداکثر چگالی g/cm^3 ۲.۲ و استحکام مکانیکی ۴۸.۷ مگاپاسکال شده است. نتایج نشان می دهد که بهینه سازی مقدار فاز بلورینه رابطه مهمی با استحکام مکانیکی دارد. در انتها نمونه ای شیشه ای از جنس سیلیس ذوبی با شفافیت مناسب و استحکام مکانیکی مناسب به وسیله فرایند تفجوشی پلاسما جرقه ای تولید شد.

۵- مراجع

- [1] F. Froes, R. Boyer, and B. Dutta, "Introduction to aerospace materials requirements and the role of additive manufacturing," in *Additive Manufacturing for the Aerospace Industry*, Elsevier, 2019, pp. 1–6. doi: 10.1016/B978-0-12-814062-8.00001-7.
- [2] "Fatigue of aerospace materials," in *Introduction to Aerospace Materials*, Elsevier, 2012, pp. 469–497. doi: 10.1533/9780857095152.469.
- [3] "Introduction to aerospace materials," in *Introduction to Aerospace Materials*, Elsevier, 2012, pp. 1–14. doi: 10.1533/9780857095152.1.
- [4] A. P. Mouritz, Ed., "2 - Aerospace materials: past, present and future," in *Introduction to Aerospace Materials*, Woodhead Publishing, 2012, pp. 15–38. doi: https://doi.org/10.1533/9780857095152.15.
- [5] B. Cour-Palais, "A career in applied physics: Apollo through Space Station," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 23, no. 1, pp. 137–168, Dec. 1999, doi: 10.1016/S0734-743X(99)00069-X.
- [6] W. Wan, C. Huang, J. Yang, and T. Qiu, "Study on Gelcasting of Fused Silica Glass Using Glutinous Rice Flour as Binder," *Int. J. Appl. Glas. Sci.*, vol. 5, no. 4, pp. 401–409, Dec. 2014, doi: 10.1111/ijag.12060.
- [7] K. K. Tedjojuwono, N. Clark, and W. M. Humphreys, "Optical characterization of window materials for aerospace applications," Sep. 2013, p. 88841I. doi: 10.1117/12.2029469.
- [8] P. Dehghani and F. Soleimani, "Effect of

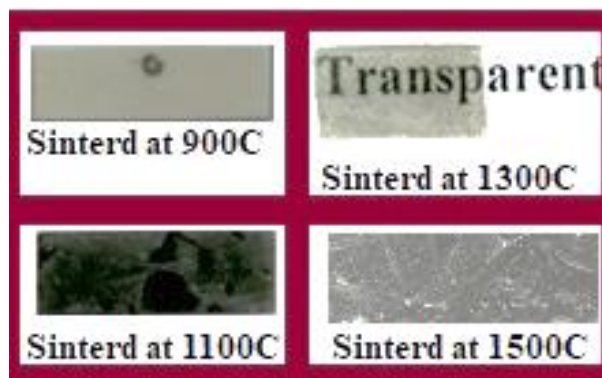
مناسبی برای تولید شیشه های سیلیس ذوبی است و بهینه دما با داشتن بیشترین استحکام مکانیکی و شفافیت بالا متعلق به نمونه با کد FS13 بوده است که در دمای ۱۳۰۰ درجه سانتی گراد تحت فشار ۵۰ مگاپاسکال عملیات تفجوشی پلاسما جرقه ای بر روی آن انجام شده است.

شکل ۷ نشان دهنده استحکام مکانیکی قطعات تولید شده است، قطعات FS9 و FS11 همانطور که در شکل ۴ و اطلاعات حاضر در جدول ۲ مشخص شده است دارای حفرات و تخلخل هایی می باشند که این تخلخل ها بر روی چگالی نهایی قطعات نیز اثرگذار بوده است. در فرآیند تفجوشی جرقه پلاسما با افزایش دما تا ۱۳۰۰ درجه سانتی گراد استحکام مکانیکی قطعات تولید شده افزایش یافته است، بهترین استحکام مکانیکی متعلق به نمونه FS13 با مقدار ۴۸.۷ مگاپاسکال بوده است، نمونه مذکور با توجه به فشار و دمای بالا کاملاً شفاف بوده و تبدیل به شیشه شده است. با افزایش دما به ۱۵۰۰ درجه سانتی گراد افت استحکام مکانیکی اتفاق افتاده است، این پدیده به علت تبلور و رشد بلورهای کریستوبالیت بوده است، بدین منظور نمونه FS13 در این بخش به عنوان نمونه شیشه بهینه معرفی شده است.

جدول ۲ برخی از مشخصه های شیشه سیلیس ذوبی تولید شده.

کد نمونه	چگالی g/cm ³	استحکام مکانیکی MPa	دمای تفجوشی C°
FS9	۲	۶.۷	۹۰۰
FS11	۲.۱	۳۵.۷	۱۱۰۰
FS13	۲.۲	۴۸.۷	۱۳۰۰
FS15	۲.۲	۱۴.۲	۱۵۰۰

جدول ۲ نشان دهنده مشخصه های حاصل شده از آزمایشات گوناگونی است که برای تولید شیشه سیلیس ذوبی در دماهای متفاوت انجام شده است. مطابق این آزمایشات مشخص شد که دما FS13 نقطه بهینه دمایی بمنظور دستیابی به خواص مکانیکی و اپتیکی مدنظر است، همچنین شکل ۸ نشان دهنده نمونه های تولید شده به روش فرایند تفجوشی پلاسما جرقه است، قابل به ذکر است که نمونه ها پس از تولید تحت سیکل کربن دابی قرار گرفته و عملیات پرداخت نهایی بمنظور رسیدن به ضخامت مدنظر و بهینه مقدار شفافیت بر روی آنها انجام گرفته است.



شکل ۸ تصویری از نمونه های تفجوشی شده پلاسما جرقه ای.

- G. McCartney, "Spark plasma sintering assisted diamond formation from carbon nanotubes at very low pressure," *Nanotechnology*, vol. 17, no. 9, pp. 2187–2191, May 2006, doi: 10.1088/0957-4484/17/9/018.
- [21] L. Li, J and Chen, F and Shen, Q and Jiang, H and Zhang, "Fabrication and dielectric properties of Si₃N₄--MgO--Al₂O₃ by spark plasma sintering technique," *Mater Sci--pol.*, pp. 699–707, 2007.
- [22] W. Provancher and A. K. Ghosh, *High temperature mechanical behavior of Nb₅Si₃/Nb laminates*, vol. 364, no. 2. United States of America: Elsevier group, 1995. doi: 10.1557/proc-364-1071.
- Cristobalite Content on Physical, Dielectric Constant, and Bending Strength of Fused Silica Ceramics Formed by Slip Casting Method," *Adv. Ceram. Prog.*, vol. 7, no. 2, 2021, doi: 10.30501/acp.2021.286931.1060.
- [9] W. Wan, C. E. Huang, J. Yang, J. Zeng, and T. Qiu, "Effect of sintering temperature on the properties of fused silica ceramics prepared by gelcasting," *J. Electron. Mater.*, vol. 43, no. 7, pp. 2566–2572, 2014, doi: 10.1007/s11664-014-3112-7.
- [10] Xuefeng Li, Shuo Lin, Jinxing Liang, Yupeng Zhang, H. Oigawa, and T. Ueda, "Fiber-Optic Temperature Sensor Based on Difference of Thermal Expansion Coefficient Between Fused Silica and Metallic Materials," *IEEE Photonics J.*, vol. 4, no. 1, pp. 155–162, Feb. 2012, doi: 10.1109/JPHOT.2011.2181943.
- [11] X. Chen, B. Yu, Y. Zhu, and A. Wang, "Deep wet etching on fused silica material for fiber optic sensors," Jan. 2004, p. 128. doi: 10.1117/12.524693.
- [12] P. Dehghani and F. Soleimani, "Effects of sintering temperature and cristobalite content on the bending strength of spark plasma sintered fused silica ceramics," *Ceram. Int.*, vol. 48, no. 12, pp. 16800–16807, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.ceramint.2022.02.230.
- [13] L. W. Shi, L. J. Wang, W. Jiang, and W. Luo, "Preparation of Highly Transparent Silica Glass by SPS Sintering of SBA-15," *Mater. Sci. Forum*, vol. 848, pp. 312–318, Mar. 2016, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.848.312.
- [14] O. Ogunbiyi, S. Salifu, R. Sadiku, T. Jamiru, O. Adesina, and O. S. Adesina, "Influence of sintering temperature on microstructure and mechanical properties of graphene-reinforced Inconel 738 LC composites," *Mater. Today Proc.*, vol. 38, pp. 743–748, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.04.192.
- [15] O. F. Ogunbiyi, E. R. Sadiku, T. Jamiru, O. T. Adesina, and L. W. Beneke, "Spark plasma sintering of Inconel 738LC: densification and microstructural characteristics," *Mater. Res. Express*, vol. 6, no. 10, p. 1065g8, Sep. 2019, doi: 10.1088/2053-1591/ab432f.
- [16] O. Ogunbiyi, T. Jamiru, R. Sadiku, O. Adesina, O. S. Adesina, and B. A. Obadele, "Spark Plasma Sintering of Graphene-Reinforced Inconel 738LC Alloy: Wear and Corrosion Performance," *Met. Mater. Int.*, Sep. 2020, doi: 10.1007/s12540-020-00871-x.
- [17] M. Suarez *et al.*, "Challenges and Opportunities for Spark Plasma Sintering: A Key Technology for a New Generation of Materials," in *Sintering Applications*, InTech, 2013. doi: 10.5772/53706.
- [18] P. Cavaliere, B. Sadeghi, and A. Shabani, "Spark Plasma Sintering: Process Fundamentals," in *Spark Plasma Sintering of Materials*, Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 3–20. doi: 10.1007/978-3-030-05327-7_1.
- [19] Z.-Y. Hu, Z.-H. Zhang, X.-W. Cheng, F.-C. Wang, Y.-F. Zhang, and S.-L. Li, "A review of multi-physical fields induced phenomena and effects in spark plasma sintering: Fundamentals and applications," *Mater. Des.*, vol. 191, p. 108662, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.matdes.2020.108662.
- [20] J. Shen, F. M. Zhang, J. F. Sun, Y. Q. Zhu, and D.