

تولید و ارزیابی خواص مکانیکی و مقاومت به شوک حرارتی جاذب خورشیدی ماکرومتخلخل کاربید سیلیسیم

امیرمسعود پروانیان، حمیدرضا سلیمی جزی* و محمدحسین فتحی
دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران، ۸۴۱۵۶۸۳۱۱۱

(دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۷/۱۱ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۸/۹/۲۷)

چکیده- توان خورشیدی تمرکز یافته یکی از منابع انرژی تجدید پذیر است که در آن از انرژی حرارتی تابش خورشیدی در توربین بخار برای تولید شبکه برق استفاده می شود. تابش خورشیدی به وسیله یک رآکتور گیرنده خورشیدی و روی سطح یک جاذب تابشی متخلخل جذب می شود. در این پژوهش، تولید و ارزیابی خواص مکانیکی و حرارتی جاذب ماکرومتخلخل کاربید سیلیسیم به منظور استفاده در رآکتور خورشیدی مدنظر قرار گرفته است. بر این اساس، فوم های کاربید سیلیسیم تولید و بر اساس اندازه حفرات به سه دسته (5, 12, 75 ppi) دسته بندی شد. رفتار مکانیکی و مقاومت به شوک حرارتی فوم های متخلخل در محدوده دمای کاری جاذب (۲۵-۱۲۰۰ درجه سانتی گراد) ارزیابی شد. نتایج نشان داد که استحکام فشاری ویژه (نسبت استحکام فشاری به وزن) فوم ها به صورت اکسپونانسیلی با کاهش درصد تخلخل (ϵ) و اندازه حفرات آنها، افزایش می یابد. همچنین برای فوم های با اندازه حفرات ریزتر، کاهش قابل توجه در استحکام مکانیکی در اثر شوک حرارتی، مشاهده شد. دلیل آن می تواند افزایش تعداد بازوهای با استحکام مکانیکی ضعیف در واحد حجم باشد. لذا از دیدگاه مقاومت مکانیکی، فوم های متخلخل دارای اندازه حفرات درشت تر دارای مقاومت به شوک حرارتی بیشتر برای کاربرد به عنوان جاذب خورشیدی هستند.

واژه های کلیدی: جاذب خورشیدی، فوم متخلخل، کاربید سیلیسیم، استحکام فشاری ویژه، توموگرافی پرتو ایکس

Synthesis and Characterization of Mechanical Behavior and Thermal Shock Resistance of Macro-Porous SiC Solar Absorber

A. M. Parvanian, H. R. Salimijazi* and M. H. Fathi

Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran, 8415683111.

Abstract: The concentrated solar power (CSP) is one of the renewable energy sources in which solar irradiation heat energy will be used in a steam turbine to generate electrical grid. Solar radiation is absorbed by a solar receiver reactor on the surface of a porous solar absorber. In this survey, synthesis and mechanical/thermal characterization of micro-porous silicon carbide (SiC) absorber to be used in solar reactor is carried out. SiC foams were synthesized and categorized based on three different pore sizes

* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: hrjazi@cc.iut.ac.ir

i.e. 5, 12 and 75 ppi. Mechanical behavior and thermal shock resistance of porous foams in the working temperature range for absorber (25-1200 °C) were evaluated. Results revealed that the specific compressive strength (σ_c/ρ) of foams increase exponentially by a decrement in the porosity percentage and the average pore size. Moreover, for foams with smaller pore size, a considerable decrease in mechanical strength due to thermal shock was observed. This could be due to increase in the number of struts per unit volume i.e. more weak struts to withstand the mechanical loading. So, porous foams with coarser pore sizes were distinguished to be more capable of tolerating thermal shock while serving as solar absorbers.

Keywords: Solar absorber, Porous foam, Silicon carbide, Specific compressive strength, X-ray Tomography, Characterization.

۱- مقدمه

را به دنبال خواهد داشت. از همین رو در چند سال اخیر برنامه‌ریزی‌های بلندمدتی به منظور پیاده‌سازی و اجرای واحدهای متعدد نیروگاهی خورشیدی به خصوص در مناطق مستعد برای این فناوری صورت گرفته است. عملیات جذب تابش خورشید در داخل رآکتور گیرنده خورشیدی و روی قطعه جاذب تابشی متخلخل انجام می‌شود. جنس این جاذب باید به گونه‌ای طراحی شود که با کمترین میزان پرت حرارتی، بالاترین نرخ انتقال حرارت به سیال ناقل و در نتیجه افزایش راندمان تولید برق از انرژی تابشی خورشید را به همراه داشته باشد.

در این پژوهش، تولید و مشخصه‌یابی پایه‌های جاذب ماکرومتخلخل کاربید سیلیسیم مدنظر قرار گرفته است به گونه‌ای که بتوان با مهندسی نحوه چیدمان خلل و فرج با استفاده از یک روش ساخت با قابلیت کنترل اندازه حفره‌ها و درصد تخلخل امکان بهینه‌سازی خواص مکانیکی و مقاومت به شوک حرارتی این پایه‌ها در حین انجام فرایند میسر شود. در ادامه در بخش دوم درباره مواد و روش انجام آزمون‌ها و در بخش سوم نتایج هر یک به تفصیل ارائه شده است.

۲- مواد و روش تحقیق

در این پژوهش، ساختارهای ماکرومتخلخل پایه کاربید سیلیسیم با استفاده از روش دوغاب‌دهی الگوی پلیمری از جنس پلی‌یورتان^۲ (P.U.) سنتز شدند. مراحل ساخت عبارتند از: (۱) شستشوی کامل الگوهای پلیمری، (۲) دوغاب‌دهی الگوی پلیمری در مخلوط سرامیکی شامل ۷۰ درصد وزنی سیلیکون کاربید (اندازه ذرات ۳۰ میکرون و خلوص تجاری) و ۳۰ درصد وزنی فلدسپار سدیک (اندازه ذرات ۶۰ میکرون و خلوص تجاری) و سیلیکات سدیم (خلوص تجاری)

امروزه فناوری توان خورشیدی تمرکز یافته در میان انواع انرژی‌های تجدیدپذیر از مهم‌ترین منابع تأمین انرژی از خورشید پس از فناوری فتوولتائیک قرار دارد. در این روش از آینه‌هایی با قدرت انعکاسی بالا به منظور کانونی کردن پرتوهای خورشید و نیز تولید انرژی حرارتی در دمای متوسط (۶۰۰-۳۰۰ درجه سانتی‌گراد) و دمای بالا (بیشتر از ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد) و انتقال حرارت از طریق سیال ناقل حرارت به توربین‌های بخاری یا گازی به منظور تولید انرژی الکتریکی استفاده می‌شود. از این رو بر خلاف فناوری فتوولتائیک^۱ که تولید مستقیم برق از خورشید را بر عهده دارد، انرژی خورشید در این فناوری پیش از تبدیل به برق به انرژی حرارتی تبدیل می‌شود. در فناوری توان خورشیدی تمرکز یافته به منظور تنظیم میزان برق شبکه با تقاضای مشترکین و نیز جبران کاهش تلفات شبکه توزیع به طور مثال در آب‌وهوای ابری، از مجموعه‌های ذخیره انرژی حرارتی استفاده می‌شود که به طور مؤثری از نوع ذخیره‌کننده انرژی الکتریکی کاربردی‌تر هستند. در این فناوری نیز همانند سایر منابع تجدیدپذیر انرژی، از انتشار گازهای گلخانه‌ای و نتایج متعاقب آن به طور مؤثری جلوگیری می‌شود. به عنوان نمونه، یک نیروگاه یک مگاواتی فناوری توان خورشیدی تمرکز یافته از انتشار ۶۸۸ تن گاز دی‌اکسید کربن در مقایسه با یک نیروگاه سیکل ترکیبی معادل و حدود ۱۶۸۰ تن گاز دی‌اکسید کربن در مقایسه با یک نیروگاه سیکل بخار/ زغال سنگ جلوگیری می‌کند. یک آینه مربع در میدان‌های خورشیدی، ۴۰۰ کیلووات ساعت برق در سال تولید می‌کند که این امر از انتشار ۱۲ تن گاز دی‌اکسید کربن جلوگیری کرده و صرفه‌جویی ۲/۵ تنی سوخت‌های فسیلی در عمر ۲۵ سال کاری



شکل ۱- نمونه‌های ماکرومتخلخل سرامیکی در اندازه حفره‌های مختلف و نحوه قرارگیری طی آزمون استحکام فشاری بر طبق استاندارد ASTM E9: الف) RPC80_A، ب) RPC80_B و ج) RPC80_C

و پس از همدمایی کامل بعد از گذشت مدت زمان ۱۵ دقیقه بلافاصله در حمام آب با دمای حدود ۲۰ درجه سانتی‌گراد کوئچ شدند. نمونه‌ها در ادامه با استفاده از جریان هوای فشرده خشک شده و در آن (با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد) به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شدند. در نهایت مشابه قبل، استحکام فشاری قطعات مورد آزمون قرار گرفت. لازم به ذکر است مشخصات نمونه‌های تهیه شده در این قسمت نیز کاملاً مشابه آزمون استحکام به وزن قطعات بوده است. نحوه کدگذاری نمونه‌ها در این مرحله به صورت TS80_XY بوده که در آن X بیانگر درجه اندازه حفره فوم (شامل A، B و C به ترتیب از درشت به ریز) و Y شماره تکرار است.

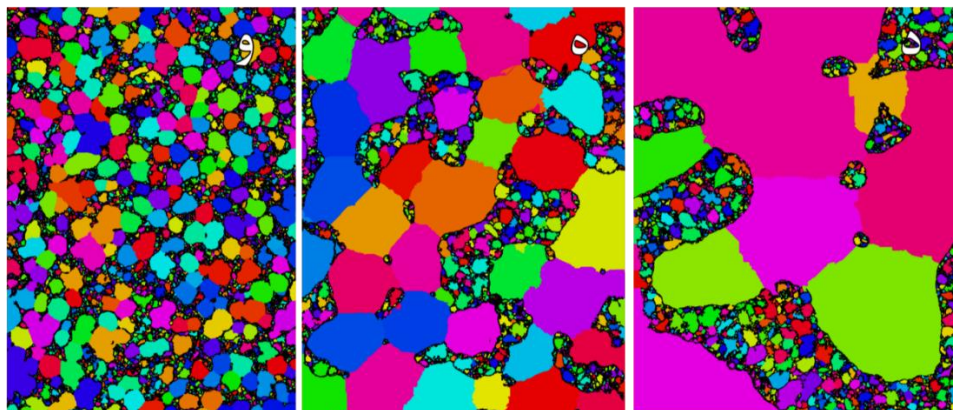
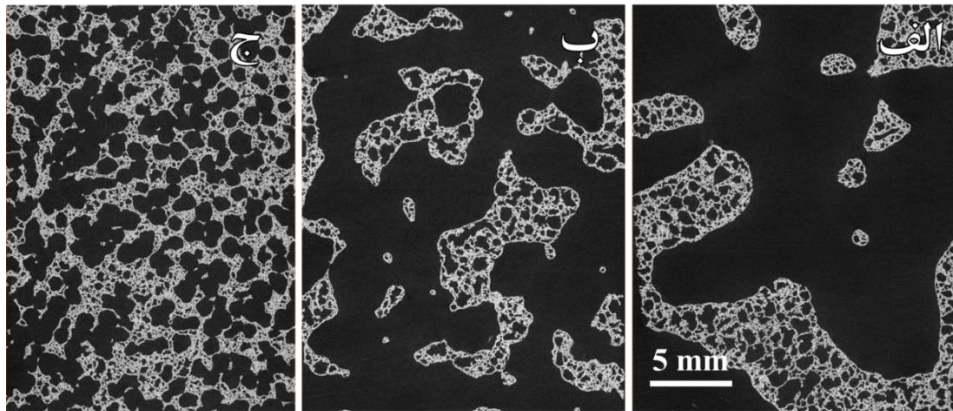
۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج توموگرافی پرتو ایکس

تصاویر توموگرافی زیرلایه‌های ماکرومتخلخل با اندازه حفره‌های متفاوت در شکل (۲) نشان داده شده است. همان‌گونه که از این دسته تصاویر مشخص است، در هر سه نمونه، توزیع دوگانه اندازه حفره‌ها به وضوح قابل شناسایی است. داربست‌های قطعه متخلخل با یک سری حفره‌های ماکروسکوپی از یکدیگر جدا شده‌اند که در عمل با تخلخل الگوی پلیمری مورد استفاده به منظور ساخت پایه متخلخل

به‌عنوان چسب که به صورت مخلوط همگن درآمده است، (۳) گرفتن دوغاب با استفاده از نورد میان دو غلطک، (۴) خشک کردن، (۵) پخت در دمای ۱۵۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۵ ساعت. در ادامه نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۱ میلی‌متر و ارتفاع ۲۰ میلی‌متر تهیه شد. مشخصات ذاتی اعم از درصد تخلخل و اندازه حفره‌های پایه‌های ماکرومتخلخل با استفاده از توموگرافی پرتو ایکس استخراج و نمونه‌ها بر اساس اندازه حفره‌ها به سه دسته A، B و C (به ترتیب از اندازه حفره درشت به ریز) طبقه‌بندی شدند. مطالعه توموگرام‌های به دست آمده با استفاده از روش‌های پیشرفته تحلیل تصویری صورت گرفته است. آزمون مکانیکی با اقتباس از استاندارد آزمون استحکام فشاری مواد در دمای محیط طبق ASTM E9 [۱] و با استفاده از دستگاه Instron مدل ۴۵۰۵ با سرعت حرکت فک بالایی ۰/۰۵ میلی‌متر بر دقیقه صورت گرفت (شکل ۱). گفتنی است که توقف آزمون در صورت افت نیروی فشاری اعمالی تا ۵۰ درصد بیشینه نیرو تعریف شده است. نحوه کدگذاری نمونه‌ها در این مرحله به صورت RPC80_XY بوده که در آن X بیانگر درجه اندازه حفره فوم (شامل A، B و C به ترتیب از درشت به ریز) و Y شماره تکرار است.

به منظور ارزیابی مقاومت به شوک حرارتی فوم‌ها، هریک از نمونه‌ها یکبار در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شده



شکل ۲- مقاطع دوبعدی تصاویر توموگرافی نمونه‌های ماکرومتخلخل با اندازه حفره‌های متفاوت: الف و د) RPC80_A، ب و ه) RPC80_B، ج و و) RPC80_C، بلافاصله پس از توموگرافی (بالا) و پس از جداسازی و برجسب گذاری حفره‌ها (پایین)

۲-۳- استحکام فشاری زیرلایه‌های فومی کاربرد سیلیسیم

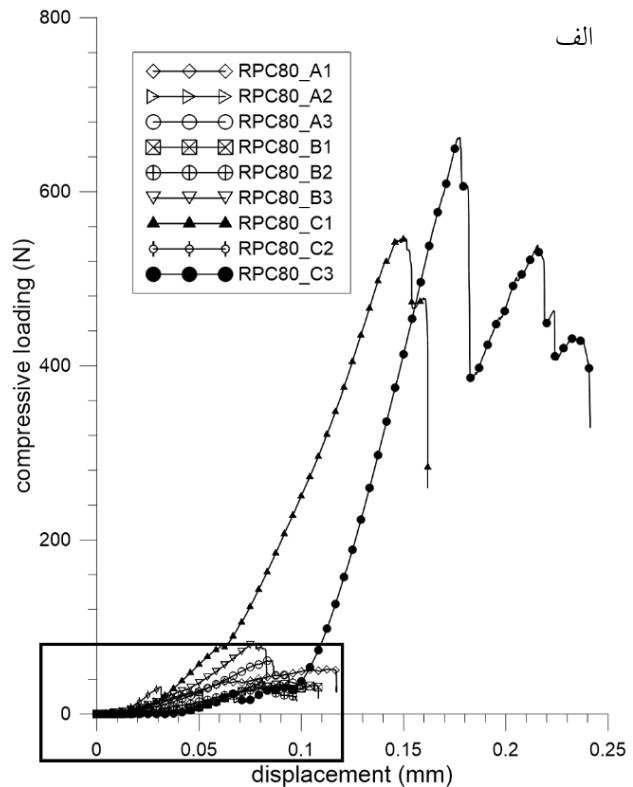
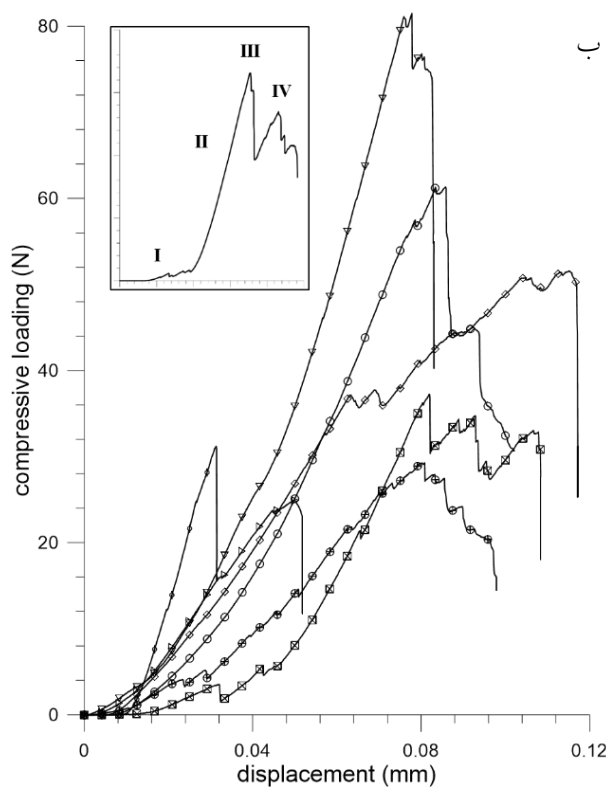
در شکل (۳) منحنی‌های نیروی فشاری- جابه‌جایی برای پایه‌های ماکرومتخلخل در اندازه حفره‌های مختلف همراه با بزرگنمایی قسمت ابتدایی نمودارها ارائه شده است. با توجه به شکل (۳)، هریک از نمودارهای نیرو- جابه‌جایی را می‌توان به چهار ناحیه مجزا تقسیم کرد که در قسمت بالایی سمت چپ شکل (۳-ب) برای نمونه RPC80_C3 به‌عنوان مثال شماره‌گذاری شده‌اند. این نواحی عبارتند از: قسمت ابتدایی نمودار که تغییرات نیرویی بسیار ناچیز به همراه جابه‌جایی‌های کم اتفاق می‌افتد که عمدتاً در اثر هم‌سطح و یا تراز شدن ناهمگونی‌های ساختاری در بازوهای حفره‌های نمونه در تماس با فک دستگاه است (I). طی یک رفتار الاستیک، نیرو متناسب با جابه‌جایی افزایش می‌یابد که البته در این ناحیه

همخوانی دارد. در این پژوهش، حفره‌های ماکروسکوپی حفره‌های اولیه نامیده شد. از طرفی درون داریست‌ها یا بازوهای میان حفره‌ها یک سری حفره‌های میکروسکوپی قابل شناسایی هستند. منشأ این دسته از حفره‌ها می‌تواند متأثر از تجزیه فاز زمینه در حین عملیات حرارتی پخت سرامیک و یا در اثر خروج محصولات حاصل از تجزیه قالب یا الگوی پلیمری مورد استفاده در فرایند ساخت باشد (حفره‌های ثانویه). به‌صورت ظاهری، اندازه حفره‌های ثانویه رابطه مستقیم با اندازه حفره‌های اولیه دارد. این ارتباط در ادامه با استفاده از پردازش تصاویر توموگرافی بررسی شد. در جدول (۱) پارامترهای میانگین حجم تخلخل اولیه و ثانویه به‌همراه میانگین درصد تخلخل، فاز جامد و فاز پوشش در هر یک از سه نمونه فوم کاربرد سیلیسیم مورد بررسی در این پژوهش مشاهده می‌شود.

جدول ۱- میانگین حجم تخلخل اولیه و ثانویه به همراه میانگین درصد تخلخل، فاز جامد و فاز پوشش در هر یک از سه نمونه فوم کاربرد

سیلیسیم با کد نمونه‌های RPC80_A، RPC80_B و RPC80_C

کد نمونه	حجم تخلخل اولیه (میلی متر مکعب)	حجم تخلخل ثانویه (میلی متر مکعب)	میانگین درصد تخلخل (درصد حجمی)	میانگین درصد فاز جامد (درصد حجمی)
RPC80_A	۱۰۹ (۵ ppi)	۰/۰۵	۸۴/۳	۱۴/۶
RPC80_B	۸/۵ (۱۲ ppi)	۰/۰۶	۸۰/۱	۱۷/۳
RPC80_C	۰/۳۸ (۷۵ ppi)	۰/۰۰۶	۷۳/۶	۲۵/۱



شکل ۳- الف) منحنی‌های نیروی فشاری - جابه‌جایی برای پایه‌های ماکرومتخلخل در اندازه حفره‌های مختلف، ب) بزرگنمایی قسمت مشخص شده در تصویر الف (نواحی مختلف منحنی برای نمونه RPC80_C3 در گوشه بالایی سمت چپ این تصویر شماره‌گذاری شده‌اند).

انباشتگی دیواره حفره‌های شکسته شده روی یکدیگر اتفاق خواهد افتاد (IV). این پدیده زمانی که نمونه فشاری در یک قالب با اندازه برابر با ابعاد نمونه احاطه شده باشد، به طوری که قطعات شکسته شده از نمونه در این قالب محصور باشند، روند صعودی نیروی فشاری خواهد داشت [۳]. لازم به ذکر است این نوسانات نیرویی تا زمانی ادامه می‌یابد که نیروی اعمالی به کمتر از ۵۰ درصد مقدار بیشینه کاهش یابد.

ممکن است شکسته شدن دیواره حفره‌ها چه در سطح نمونه (در تماس با فک دستگاه) یا در درون ساختار و ایجاد ترک اتفاق افتد (II). در پژوهش‌های مشابه نیز این رفتار برای فوم‌های تخلخل باز سرامیکی گزارش شده است [۲ و ۳]. با تأمین تنش تسلیم و متعاقب آن افزایش فشار اعمالی، اشاعه ترک و سپس افت ناگهانی نیرو مشاهده خواهد شد (III) تا اینکه در ادامه نوسانات نیروی فشاری در اثر شکسته شدن حفره‌های محلی و تا حدودی

پراکندگی میان بیشینه نیروی فشاری به چشم می‌خورد. به‌طور کلی، میزان پراکندگی در استحکام فوم‌های سرامیکی به‌طور محسوسی بیشتر از فوم‌های پلیمری و فلزی است. در عمل، پراکندگی در میزان استحکام فشاری به‌دلیل تنوع اندازه و شکل عیوب و ناهمواری‌های ساختاری فوم رخ می‌دهد به‌گونه‌ای که شکست از ریزترین عیوب در ماده آغاز خواهد شد [۴]. به‌عنوان مثال، ناهمگونی‌ها و یا عیوب ساختاری قادر است مدول الاستیک و استحکام فشاری سرامیک‌ها را تا ۳۰۰ درصد تحت تأثیر قرار دهد [۵]. در جدول (۲) برخی خواص فیزیکی به‌همراه نتایج اندازه‌گیری آزمون مکانیکی نمونه‌های جاذب ماکرومتخلخل در اندازه حفره‌های متفاوت در کنار مقادیر میانگین در یک ستون جداگانه ارائه شده است. مقدار درصد تخلخل، ε ، نیز طبق رابطه $1 - \frac{\rho}{\rho_{th}}$ با مقدار پیش‌فرض $\rho_{th} = 2/98$ محاسبه شده است.

در شکل (۴-الف) روند تغییرات میانگین استحکام فشاری ویژه، $\frac{\sigma_c}{\rho}$ ، برحسب میانگین درصد تخلخل، ε ، برای قطعات در سه دسته اندازه حفره مورد بررسی در این پژوهش ارائه شده است. لازم به‌ذکر است نمونه RPC80_C2 در همان ابتدای اعمال نیروی فشاری دچار شکست شد و لذا مقدار آن از داده‌های تحلیلی حذف شده است. به‌طور کلی، سرامیک‌ها دارای شکست ترد هستند که این تردی بیشتر به‌دلیل مقاومت کم این مواد در برابر اشاعه غیرپایدار نواقص ذاتی از جمله ترک، خلل و فرج و یا ناخالصی‌ها است. مطالعات متعددی به‌منظور بررسی ارتباط رفتار مکانیکی ساختارهای متخلخل سرامیکی با ویژگی‌های فیزیکی، به‌طور ویژه اثر درصد تخلخل (و یا چگالی)، صورت گرفته است [۳ و ۱۰-۶]. در برخی از این پژوهش‌ها، با در نظر گرفتن یک واحد شبکه به‌عنوان نماینده‌ای از کل ساختار و اندازه‌گیری خواص مکانیکی برای آن و تعمیم به کل ساختار، ارتباط مذکور مدل‌سازی و استخراج شده است [۱۰-۱۲]. در برخی مطالعات تجربی مشابه با پژوهش حاضر نیز رفتار مکانیکی ساختار متخلخل طبق رابطه ذیل به یکدیگر نسبت داده

شده‌اند [۱۳].

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-b\varepsilon) \quad (1)$$

در رابطه اخیر، σ و σ_0 به‌ترتیب استحکام ماده متخلخل با تخلخل و بدون تخلخل، ε ، هستند. ثابت b نیز به خصوصیات فیزیکی و مورفولوژیکی حفره‌ها بستگی دارد. بنابراین طبق این رابطه، استحکام مکانیکی سرامیک متخلخل طبق یک رابطه اکسپونانسیلی^۳ با درصد تخلخل ارتباط داده شده است به‌گونه‌ای که افزایش درصد تخلخل و به‌دنبال آن کاهش چگالی ظاهری، افت خواص مکانیکی ساختار را موجب خواهد شد. همان‌گونه که در شکل (۴-الف) نیز نشان داده شده است، با افزایش ε مقدار میانگین استحکام فشاری ویژه نمونه‌های ماکرومتخلخل سرامیکی به‌صورت اکسپونانسیلی طبق رابطه (۱) کاهش می‌یابد:

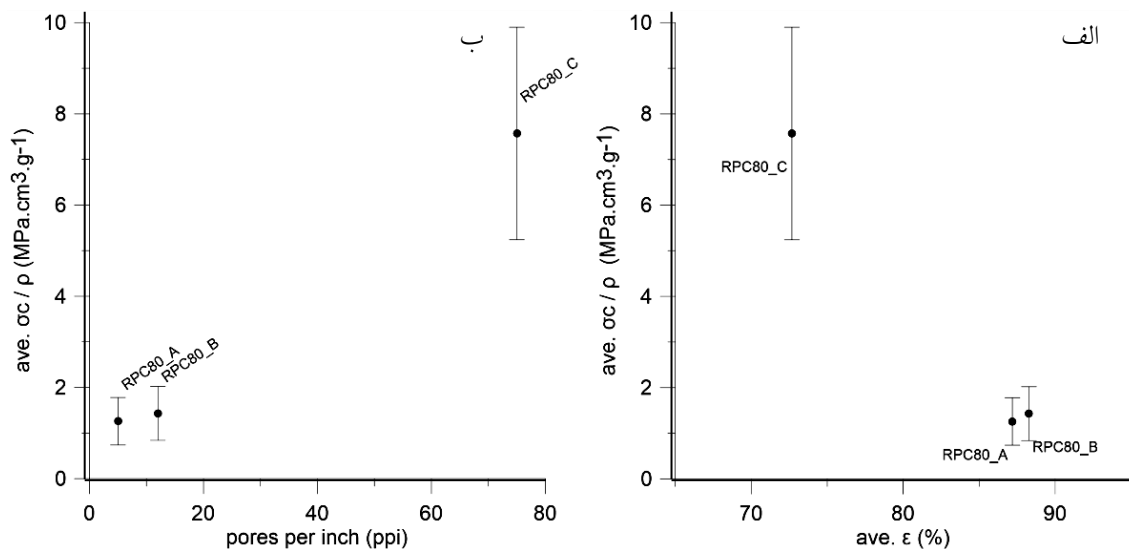
$$\ln \frac{\sigma_c}{\rho} = 10.3 - 0.114\varepsilon; R^2 = 0.98 \quad (2)$$

رابطه اکسپونانسیلی اخیر انطباق خوبی با کارهای مشابه دارد که نشان‌دهنده اثرگذاری بالای درصد تخلخل بر انتخاب ماده متخلخل در کاربردهای مورد نظر است که در عمل این اثرپذیری صرف‌نظر از نوع فرایند ساخت قطعه ماکرومتخلخل خواهد بود [۱۴].

شکل (۴-ب) نیز تغییرات میانگین استحکام فشاری ویژه قطعات ماکرومتخلخل را نسبت به اندازه حفره‌های نمونه‌ها برحسب تعداد تخلخل در واحد اینچ، ϕ_{pi} ، نشان می‌دهد. لازم به‌ذکر است اندازه حفره‌ها برای سه دسته نمونه مورد بررسی (A، B و C) به‌ترتیب از حفره‌های درشت به ریز) بر اساس پردازش تصاویر توموگرافی به‌دست آمده‌اند. به‌طور کلی مواد متخلخل را می‌توان به‌صورت ماده کامپوزیتی متشکل از زمینه و فضای خالی دانست. بنابراین همچون هر ماده کامپوزیتی دیگر، ویژگی‌های هر یک از این دو فاز می‌تواند روی خواص مکانیکی کل ساختار متخلخل اثرگذار باشد. علاوه بر درصد خلل و فرج، اندازه حفره‌ها، شکل و مورفولوژی آنها نیز بر خواص مکانیکی ساختارهای متخلخل اثرگذارند. فرایند ساخت فوم‌های سرامیکی تولید شده بر پایه الگوی پلیمری فداشونده

جدول ۲- رفتار مکانیکی (شامل استحکام فشاری و استحکام ویژه) نمونه‌های جاذب ماکرومتخلخل در اندازه حفره‌های متفاوت به همراه برخی خواص فیزیکی آنها (میانگین مقادیر هر پارامتر در یک ستون جداگانه در کنار هر یک آورده شده است).

استحکام ویژه (مگاپاسکال سانتی‌متر مکعب بر گرم)	استحکام فشاری (مگاپاسکال)	استحکام فشاری (نیوتن)	بیشینه نیروی فشاری	درصد تخلخل (درصد)	چگالی ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	وزن (گرم)	حجم (سانتی‌متر مکعب)	کد نمونه
۱/۲۵	۰/۵۴	۵۱/۵۵	۸۵/۴	۰/۴۳۵	۰/۸۳	۱/۹	RPC80_A1	
۱/۲۶±۰/۵۲	۰/۲۶	۲۵/۰۰	۸۷/۲±۱/۳	۰/۳۵۱	۰/۶۷	۱/۹	RPC80_A2	
۱/۷۹	۰/۶۵	۶۱/۳۱	۸۷/۹	۰/۳۶۰	۰/۶۸	۱/۹	RPC80_A3	
۱/۱۴	۰/۳۹	۳۷/۲۶	۸۷/۵	۰/۳۴۲	۰/۶۵	۱/۹	RPC80_B1	
۱/۴۳±۰/۵۹	۰/۳۱	۲۹/۲۸	۹۰/۰	۰/۲۹۸	۰/۵۷	۱/۹	RPC80_B2	
۲/۱۰	۰/۸۶	۸۱/۴۹	۸۶/۳	۰/۴۰۸	۰/۷۸	۱/۹	RPC80_B3	
۹/۲۲	۵/۷۵	۵۴۶/۴۱	۷۹/۱	۰/۶۲۴	۱/۱۹	۱/۹	RPC80_C1	
۷/۵۷±۴/۳۹	۰/۵۱	۳۱/۲۰	۷۲/۷±۸/۶	۰/۶۴۰	۱/۰۹	۱/۷۱	RPC80_C2	
۵/۹۲	۶/۹۷	۶۶۲/۴۹	۶۰/۵	۱/۱۷۹	۱/۹۰	۱/۶۱	RPC80_C3	

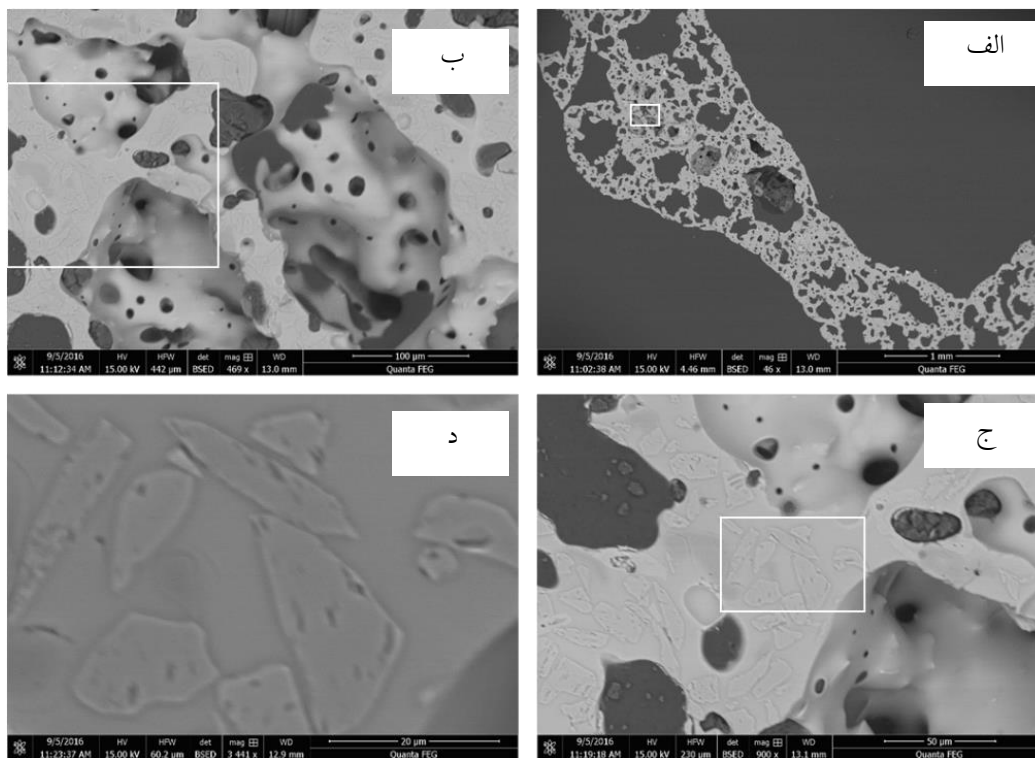


شکل ۴- روند تغییرات میانگین استحکام فشاری ویژه: الف) برحسب درصد تخلخل و ب) برحسب تعداد تخلخل در واحد اینچ (ppi) برای نمونه‌های ماکرومتخلخل در سه اندازه حفره متفاوت

در رابطه با ارتباط میان استحکام ساختار متخلخل با d_{pore} تحقیقات مشابهی روی مواد متخلخل از جنس‌های مختلف سنتز شده با روش‌های گوناگون صورت گرفته است [۳، ۱۷] و [۱۸]. در برخی از این پژوهش‌ها، استحکام ماده متخلخل نسبت عکس با قطر حفره‌ها، نشان می‌دهد که دلیل عمده آن افزایش میزان تحمل بار مکانیکی بازوهای ساختار متخلخل به دنبال ریزتر شدن حفره‌ها بیان شده است. به‌عنوان مثال، برنزی و گرین [۱۷] با مطالعه روی فوم‌های کربنی شیشه‌ای دریافتند هم استحکام فشاری و هم خمشی با اندازه حفره‌ها رابطه عکس دارند. این در حالی است که ضریب کشسانی و چقرمگی شکست، هر دو به صورت مستقل از اندازه حفره‌ها گزارش شده‌اند. در برخی دیگر رابطه مستقیم میان دو نسبت گفته شده مشاهده می‌شود و علت آن افزایش میزان نواقص سطحی همچون ترک و گوشه‌های تیز و در نتیجه مراکز تمرکز تنش در اثر افزایش ppi بیان شده است [۳]. درحقیقت با یک نتیجه‌گیری کلی از این پژوهش‌ها می‌توان دریافت که ارتباط میان استحکام و اندازه حفره‌های ساختار متخلخل را می‌بایست با توجه به مورفولوژی و ریزساختار ماده بررسی کرد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی^۴ نمونه RPC80_A2 به‌منظور بررسی ریزساختاری

به‌گونه‌ای است که لایه دوغاب پوشش داده شده، ساختاری شبیه به الگوی پلیمری را خواهد داشت و با عنایت به ساختار ایزوتروپ الگوی پلیمری اولیه می‌توان انتظار یک ساختار سرامیکی متخلخل ایزوتروپ را نیز داشت. بنابراین برخی پارامترهای ریزساختاری همچون وجود دانه‌های درشت یا توزیع وسیع اندازه حفره‌ها می‌تواند روی خواص مکانیکی ساختارهای متخلخل ایزوتروپ به دلیل وجود مناطق ضعیف‌تر و در نتیجه نواحی تمرکز تنش تأثیر بگذارد [۱۵]. درحقیقت هرگونه تغییر در درصد تخلخل (یا چگالی ظاهری) و نیز اندازه حفره‌های ماده متخلخل می‌تواند منجر به تغییرات محسوسی در ریزساختار بازوها و تعداد حفره‌ها و وجوه بسته شود که همگی بر خواص مکانیکی قطعه تأثیرگذار هستند [۱۶]. مطابق نمودار شکل (۴-ب)، افزایش ppi (یا کاهش قطر حفره‌ها) در نمونه‌های فومی کاربید سیلیسیم، افزایش مقدار میانگین استحکام فشاری را به همراه دارد. با در نظر گرفتن ارتباط میان $d_{pore(\mu m)}$ و ppi به صورت $ppi = 2.54E4d_{pore}^{-1}$ رابطه اکسپونانسیلی زیر را می‌توان استنتاج کرد:

$$\ln \frac{\sigma_c}{\rho} = 0.07 + 0.066E4d_{pore}^{-1}; R^2 = 0.99 \quad (3)$$



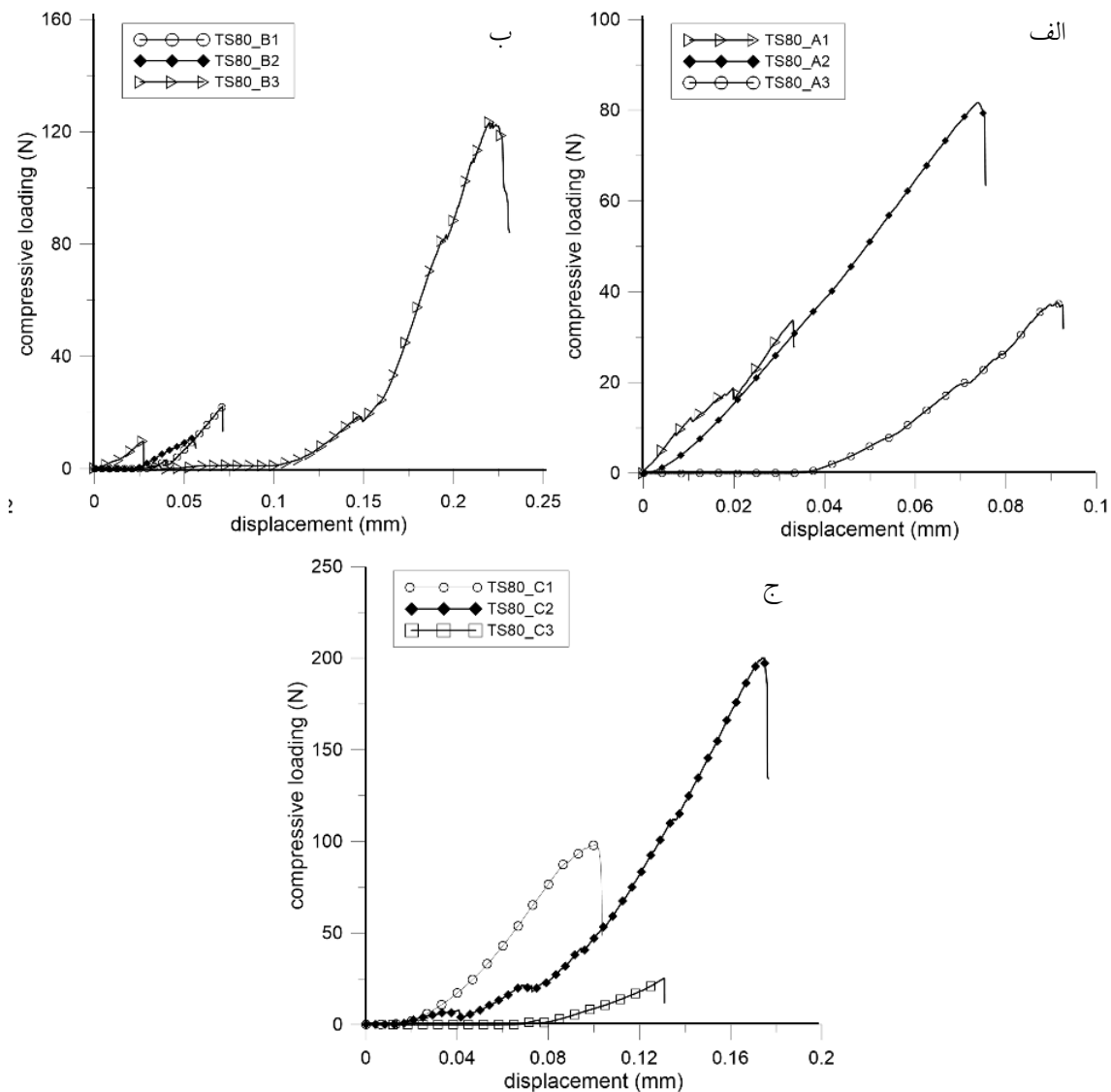
شکل ۵- تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی با آشکارساز الکترون‌های برگشتی از مقاطع پالیش شده نمونه ماکرومتخلخل RPC80_A2 قبل از اعمال شوک حرارتی

۳-۳- مقاومت به شوک حرارتی پایه‌های ماکرومتخلخل

در شکل (۶) نمودارهای نیرو- جابه‌جایی نمونه‌های فومی شوک حرارتی شده از دمای کاری ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد تا دمای محیط آورده شده است. تغییرات وزنی در اثر اعمال شوک حرارتی ناچیز (کمتر از ۱/۰ درصد) بوده که می‌تواند نشان‌دهنده پایداری حجمی زیرلایه‌های فومی کاربید سیلیسیم در اثر تغییرات شدید حرارتی باشد که این امر در ادامه مورد بررسی بیشتر قرار خواهد گرفت. در این سری از آزمایش‌ها نیز از نوسانات نیرویی پس از نقطه تسلیم، σ_p ، که عمدتاً در اثر شکست بیشتر دیواره حفره‌ها و نیز تا حدودی انباشتگی تخلخل‌ها روی هم است، صرف نظر شده است.

نتایج محاسبات خواص مکانیکی به‌همراه برخی ویژگی‌های فیزیکی نمونه‌ها نیز در جدول (۳) خلاصه شده است. مقایسه این داده‌ها با آنچه پیش از اعمال شوک حرارتی به‌دست آمده است (جدول ۲) تغییرات استحکام پایه‌ها در اثر شوک حرارتی

بیشتر در شکل (۵) ارائه شده است. طبق این تصاویر که در بزرگنمایی‌های مختلف تهیه شده‌اند و نیز تصاویر ماکروتوموگرافی نمونه‌های متخلخل در سه اندازه حفره متفاوت شکل (۲) ریزساختار نمونه‌های متخلخل شامل ساختار فومی با تخلخل (اولیه و ثانویه) کروی شکل است به‌گونه‌ای که درون بازوهای حفره‌ها، عوارض تیغه‌ای شکل مشاهده می‌شود که به‌نظر می‌رسد در اثر شیشه‌ای شدن در حین فرایند پخت نمونه‌های فومی تشکیل شده باشند (شکل ۵-د). از آنجا که تمرکز تنش در مورفولوژی کروی به‌دلیل عدم وجود نقطه مرجح بسیار کم است، افزایش تعداد حفره‌ها (ppi) نه تنها اثرات منفی روی استحکام نخواهد داشت، بلکه استحکام فشاری ویژه با کاهش اندازه حفره‌ها، همان‌گونه که در شکل (۴-ب) نیز نشان داده شده است، مطابق رابطه (۳) افزایش می‌یابد. این در حالی است که احتمالاً در صورت وجود حفره‌ها سوزنی‌شکل، این اثر معکوس خواهد بود.



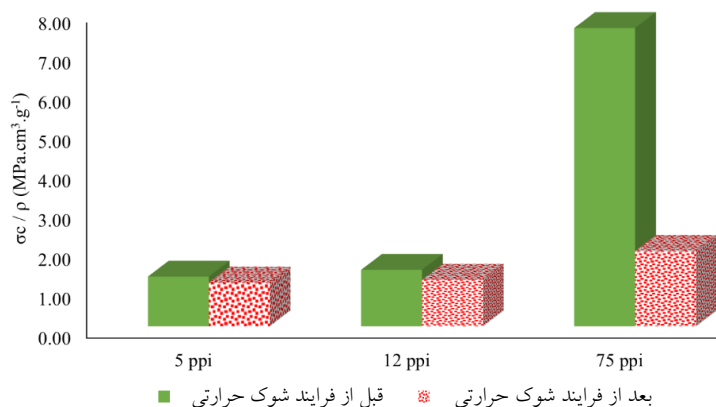
شکل ۶- منحنی‌های نیرو-جاب‌جایی برای سه دسته زیرلایه ماکرومتخلخل: الف) TS80_A، ب) TS80_B و ج) TS80_C پس از اعمال شوک حرارتی (قرارگیری در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۵ دقیقه و کوئنچینگ در آب با دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد)

حرارتی ایجاد شده تنها به تغییرات پلاستیک محدود منجر خواهد شد. تنش‌های حرارتی به ویژگی‌های فیزیکی ماده از قبیل: استحکام، σ ، ضریب انبساط حرارتی، α ، ضرایب کشسانی، E و هدایت حرارتی، λ ، ظرفیت حرارتی ویژه، C_p و چگالی، ρ بستگی دارد. به‌عنوان مثال، مقاومت به شوک حرارتی یک ماده با افزایش σ افزایش می‌یابد. این درحالی است که افزایش E و یا α موجب کاهش این مقدار خواهد شد. همچنین در صورت انتقال گرما، λ نیز می‌تواند روی مقاومت

در محدوده دمایی ۱۲۰۰-۲۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. لذا در ادامه به بررسی این تغییرات پرداخته خواهد شد. به‌طور کلی مواد سرامیکی به شوک و خستگی حرارتی بسیار حساس هستند که دلیل آن توزیع دمایی غیرهمگن به‌وجود آمده در اثر سرد یا گرم شدن ناگهانی و متعاقب آن تنش‌های حرارتی به‌وجود آمده است که عامل توسعه ترک‌های ساختاری و در نتیجه تضعیف ساختار سرامیک است. این درحالی است که به‌عنوان مثال در مورد فلزات، تنش‌های

جدول ۳- رفتار مکانیکی (شامل استحکام فشاری و استحکام ویژه) نمونه‌های جاذب ماکرومتخلخل در اندازه حفره‌های متفاوت پس از اعمال شوک حرارتی در محدوده دمایی ۲۰-۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد به‌همراه برخی خواص فیزیکی هریک

استحکام ویژه (مگاپاسکال سانتی متر مکعب بر گرم)	استحکام فشاری (مگاپاسکال)	بیشینه نیروی فشاری (نیوتن)	درصد تخلخل (درصد)	چگالی ظاهری (گرم بر سانتی متر مکعب)	وزن (گرم)	حجم (سانتی متر مکعب)	کد نمونه
۰/۷۵	۰/۳۴	۳۲/۰۵	۸۴/۹۹	۰/۴۵	۰/۸۵	۱/۹	TS80_A1
۱/۷۴	۰/۵۲±۰/۲۹	۸۱/۷۰	۸۴/۲±۰/۸	۰/۴۹	۰/۹۴	۱/۹	TS80_A2
۰/۸۳	۰/۴۰	۳۷/۵۵	۸۴/۰۶	۰/۴۸	۰/۹۰	۱/۹	TS80_A3
۰/۵۲	۰/۲۳	۲۲/۱۴	۸۵/۰۸	۰/۴۴	۰/۸۵	۱/۹	TS80_B1
۱/۱۸±۱/۳۱	۰/۱۲	۱۱/۰۷	۸۵/۷±۲/۳	۰/۳۵	۰/۶۶	۱/۹	TS80_B2
۲/۷۰	۱/۳۰	۱۲۳/۴۶	۸۳/۸۳	۰/۴۸	۰/۸۷	۱/۸۱	TS80_B3
۲/۰۳	۱/۰۳	۹۸/۱۰	۸۲/۹۴	۰/۵۱	۰/۹۷	۱/۹	TS80_C1
۱/۹۱±۱/۳۸	۲/۱۱	۲۰۰/۱۷	۸۰/۶±۲/۴	۰/۶۵	۱/۲۴	۱/۹	TS80_C2
۰/۴۷	۰/۲۷	۲۵/۲۲	۸۰/۸۹	۰/۵۷	۰/۹۷	۱/۷۱	TS80_C3



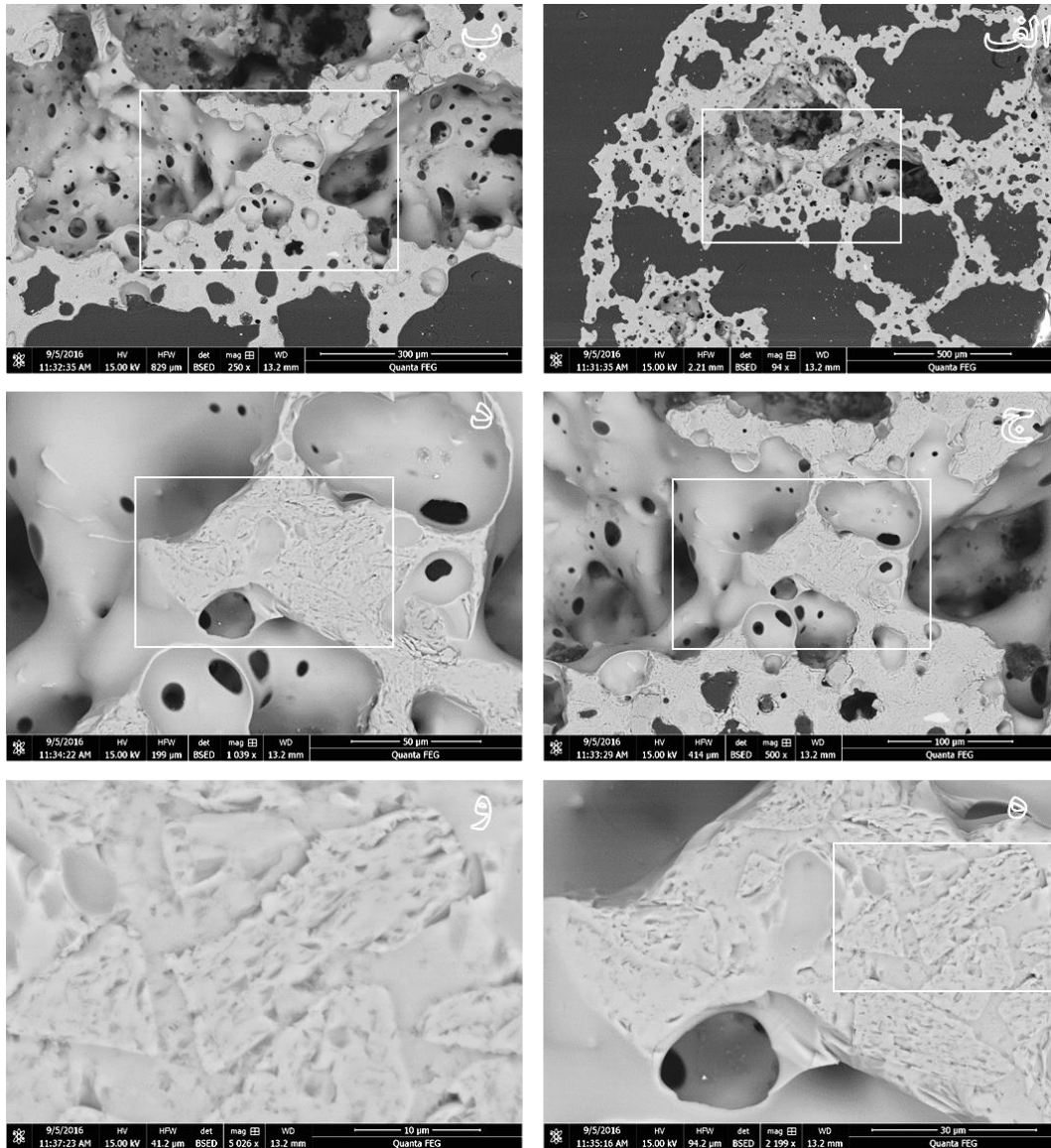
شکل ۷- میانگین استحکام فشاری ویژه فوم‌های کاربرد سیلیسیم در سه اندازه حفره متفاوت قبل و بعد از اعمال شوک حرارتی

متفاوت ارائه شده است. مطابق تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی، ترک ساختاری قابل توجهی که علت اصلی کاهش مقاومت ساختار متخلخل باشد مشاهده نمی‌شود. البته مقایسه تصاویر با آنچه در شکل (۸) برای نمونه با شرایط مشابه از لحاظ درصد تخلخل و اندازه حفره‌ها ولی بدون شوک حرارتی آورده شده است، نشان از تغییرات ریزساختاری بازوهای حفره‌ها به صورت ساختار سوزنی شکل در اثر اعمال تنش‌های حرارتی دارد. این تغییرات ریزساختاری ایجاد شده در حین سرد شدن ناگهانی از دمای بالا می‌تواند به تشکیل نقاط مستعد برای تمرکز تنش و افت خواص مکانیکی منجر شود.

تصاویر میکروسکوپی نشان می‌دهد که ساختار سوزنی، تغییرات فازی درون تیغه‌های غنی از سیلیس را به همراه نداشته و می‌توان آن را به نوعی میکروتُرک‌های ایجاد شده در فاز شیشه‌ای این تیغه‌ها در اثر تنش‌های حرارتی اعمالی در نظر گرفت. همین میکروتُرک‌ها عامل اصلی کاهش استحکام فشاری پایه‌های ماکرومتخلخل پس از سرد کردن سریع از دمای بالا هستند. بنابراین این رفتار به‌طور ویژه برای فوم‌های با تخلخل ریزتر بایستی در کاربرد به‌عنوان جاذب تابش خورشیدی مدنظر قرار گیرد تا با مقایسه دو عامل اندازه حفره‌ها و نیز میزان مقاومت به شوک حرارتی، انتخاب ماده مناسب به‌درستی صورت گیرد.

شوک حرارتی اثر بگذارد [۱۹]. در این رابطه تحقیقات مشابهی نیز روی ارتباط میان مقاومت شوک حرارتی فوم‌های سرامیکی با خواص فیزیکی به‌خصوص d_{pore} صورت گرفته است. تحقیقات روی مواد مختلف نشان از ارتباط مستقیم مقاومت شوک حرارتی با اندازه حفره‌ها و نیز وابستگی نامحسوسی با چگالی (یا درصد تخلخل) ماده دارد [۲۰]. در شکل (۷) نمودار تغییرات میانگین استحکام فشاری ویژه برای پایه‌های ماکرومتخلخل برحسب اندازه حفره‌های مختلف، قبل و بعد از اعمال شوک حرارتی آورده شده است. مطابق این نمودار، کاهش استحکام در اثر اعمال شوک حرارتی برای سه دسته نمونه TS80_A، TS80_B و TS80_C، به‌ترتیب با میانگین اندازه حفره‌ها معادل ۵، ۱۲ و ۷۵ ppi، حدود ۱۲، ۱۷/۵ و ۷۴/۸ درصد است. بنابراین به‌نظر می‌رسد افزایش ppi یا کاهش اندازه حفره‌ها، افت خواص مکانیکی بیشتری در اثر اعمال شوک حرارتی به قطعات سرامیکی را به‌همراه دارد. این می‌تواند به دلیل چگالی (تعداد در واحد حجم) بالای دیواره حفره‌ها و به‌دنبال آن ضخامت کمتر دیواره حفره‌ها در نمونه‌های ماکرومتخلخل با اندازه حفره‌های کوچک‌تر باشد که حساسیت قطعه به شوک حرارتی را افزایش خواهد داد.

به‌منظور مطالعه بیشتر تغییرات ریزساختاری ایجاد شده در اثر اعمال تنش‌های حرارتی، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مقاطع شکست نمونه TS80_A1 در شکل (۸) با بزرگنمایی‌های



شکل ۸- تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی با آشکارساز الکترون‌های برگشتی از مقاطع پالیش‌شده نمونه ماکرومتخلخل TS80_A1 پس از اعمال شوک حرارتی

۴- نتیجه‌گیری

موارد زیر به‌عنوان نتایج به‌دست آمده از آزمون رفتار مکانیکی و نیز خاصیت مقاومت به شوک حرارتی جاذب تابشی ماکرومتخلخل کاربید سیلیسیم مطرح هستند:

- اندازه‌گیری استحکام فشاری نشان از پراکندگی میان‌بیشینه نیروی فشاری دارد. در عمل، پراکندگی در میزان استحکام فشاری به‌دلیل تنوع اندازه و شکل عیوب و ناهمواری‌های ساختاری فوم رخ می‌دهد.

- مقاومت مکانیکی نمونه‌های جاذب کاربید سیلیسیم رابطه اکسپونانسیلی با درصد تخلخل و نیز اندازه حفره‌ها نشان می‌دهد، به‌گونه‌ای که کاهش درصد تخلخل و نیز کاهش اندازه حفره‌ها، d_{pore} ، افزایش استحکام فشاری ویژه (نسبت استحکام فشاری به وزن) این مواد را به‌همراه دارد.
- نمونه‌های جاذب با اندازه حفره‌های ریزتر حساسیت بیشتری به تنش‌های حرارتی ایجاد شده در اثر تغییرات دمایی نشان می‌دهند. دلیل آن می‌تواند افزایش تعداد بازوهای حفره‌ها با

میزان مقاومت مکانیکی را در اثر تنش‌های حرارتی محیطی داشته باشد. بنابراین از دیدگاه مقاومت مکانیکی، دو دسته اندازه حفره دیگر (۱۲ و ۵ ppi) برای کاربرد مورد نظر در این پژوهش مناسب‌تر به نظر می‌رسند.

کاهش اندازه حفره‌ها باشد که در اثر اعمال شوک حرارتی تعداد بازوهای دچار تنش حرارتی شده در واحد حجم افزایش و در نتیجه مقاومت مکانیکی کاهش بیشتری خواهد یافت. لذا با استناد بر نتایج به دست آمده به نظر می‌رسد، استفاده از فوم‌های با ریزترین اندازه حفره (در این پژوهش ۷۵ ppi) با وجود داشتن سطح ویژه در تماس بالاتر می‌تواند بیشترین افت

واژه‌نامه

- 1- photovoltaic
- 2- Polyurethane

- 3- exponential
- 4- scanning electron microscopy

مراجع

1. ASTM, *Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature*, In E09-09, 2009.
2. Seeber, B. S. M., Gonzenbach U. T., and Gauckler L. J., "Mechanical Properties of Highly Porous Alumina Foams", *Journal of Materials Research*, Vol. 28, No. 17, pp. 2281-2287, 2013.
3. Dam, C. Q., Brezny, R., and Green, D. J., "Compressive Behavior and Deformation-Mode Map of an Open Cell Alumina", *Journal of Materials Research*, Vol. 5, No. 1, pp. 163-171, 1990.
4. Munz, D., and Fett, T., *Ceramics: Mechanical Properties, Failure Behaviour, Materials Selection*, Vol. 36, Springer Science & Business Media, 2013.
5. Reilly, D. T., and Burstein, A. H., "The Mechanical Properties of Cortical Bone", *Journal of Bone and Joint Surgery*, Vol. 56, No. 5, pp. 1001-1022, 1974.
6. Zhao, K., "Porous Hydroxyapatite Ceramics by Ice Templating: Freezing Characteristics and Mechanical Properties", *Ceramics International*, Vol. 37, No. 2, pp. 635-639, 2011.
7. Lian, C., Zhuge Y., and Beecham S., "The Relationship Between Porosity and Strength for Porous Concrete", *Construction and Building Materials*, Vol. 25, No. 11, pp. 4294-4298, 2011.
8. Li, Y., "Effect of V₂O₅ Addition on the Properties of Reaction-Bonded Porous SiC Ceramics", *Ceramics International*, Vol. 40, No. 10, Part B, pp. 16581-16587, 2014.
9. Rice, R. W., "Comparison of Stress Concentration Versus Minimum Solid Area Based Mechanical Property-Porosity Relations", *Journal of Materials Science*, Vol. 28, No. 8, pp. 2187-2190, 1993.
10. Ashby, M. F., and Medalist, R. F. M., "The Mechanical Properties of Cellular Solids", *Metallurgical Transactions A*, Vol. 14, No. 9, pp. 1755-1769, 1983.
11. Gibson, L. J., and Ashby, M. F., *Cellular Solids: Structure and Properties*, Cambridge University Press, 1999.
12. Gibson, L. J., and Ashby, M. F., "The Mechanics of Three-Dimensional Cellular Materials", *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1982.
13. Ryshkewitch, E., "Compression Strength of Porous Sintered Alumina and Zirconia", *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 36, No. 2, pp. 65-68, 1953.
14. Eom, J. -H., Kim, Y. -W., and Raju, S., "Processing and Properties of Macroporous Silicon Carbide Ceramics: A Review", *Journal of Asian Ceramic Societies*, Vol. 1, No. 3, pp. 220-242, 2013.
15. Seuba, J., "Mechanical Properties and Failure Behavior of Unidirectional Porous Ceramics", *Scientific Reports*, Vol. 6, p. 24326, 2016.
16. Vedula, V. R., Green, D. J., and Hellman, J. R., "Thermal Shock Resistance of Ceramic Foams", *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 82, No. 3, pp. 649-656, 1999.
17. Brezny, R., and Green, D. J., "The Effect of Cell Size on the Mechanical Behavior of Cellular Materials", *Acta Metallurgica et Materialia*, Vol. 38, No. 12, pp. 2517-2526, 1990.
18. Lichtner, A., "Effect of Macropore Anisotropy on the Mechanical Response of Hierarchically Porous Ceramics", *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 99, No. 3, pp. 979-987, 2016.
19. Scheffler, M., and Colombo, P., *Cellular Ceramics: Structure, Manufacturing, Properties and Applications*, John Wiley & Sons, 2006.

20. She, J., Ohji, T., and Deng, Z. Y., "Thermal Shock Behavior of Porous Silicon Carbide Ceramics", *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 85, No. 8, pp. 2125-2127, 2002.
21. Ding, S., Zeng, Y. -P., and Jiang, D., "Thermal Shock Behaviour of Mullite-Bonded Porous Silicon Carbide Ceramics with Yttria Addition", *Journal of*

Physics D: Applied Physics, Vol. 40, No. 7, p. 2138, 2007.