

بررسی خواص بدنه متخلخل کاربید تنگستن تولید شده به روش ریخته گری ژله ای

امید یعقوبی زاده^{۱*}، حمیدرضا بهاروندی^۲، علی علیزاده^۲

چکیده

در این پژوهش از روش ریخته گری ژله ای جهت تولید بدنه متخلخل کاربید تنگستن استفاده گردید. برای این منظور از سیستم پلیمری متاکریل آمید- متیلن بیس آکریل آمید به عنوان منومر اصلی و شاخه ساز استفاده شد، در ابتدا منومرها در آب مقطر حل شدند و پودر کاربید تنگستن به دوغاب اضافه شد. سپس آمونیوم پرسولفات به عنوان آغازگر و تترا متیل اتیلن دی آمید به عنوان کاتالیست به دوغاب افزوده شد، بلافاصله دوغاب بدست آمده درون قالب ریخته و قالب به مدت ۳۰ دقیقه در دمای 50°C قرار داده شد تا ژل تشکیل شود. سپس نمونه های خام از قالب خارج و در دمای اتاق خشک شدند و در کوره تحت آرگون پیرولیز و در دمای 1450°C تفجوشی شدند. بعد از بررسی رفتار رئولوژیکی دوغاب، مشخص شد میزان بهینه پراکنده ساز حدود $0.2\% \text{ wt}$ پودر سرامیکی می باشد. همچنین ارزیابی رفتار حرارتی پلیمر نشان داد که بعد از دمای 600°C پلیمری در ساختار باقی نمی ماند. بعد از تفجوشی نمونه ها، تاثیر میزان بار سرامیکی بر تخلخل و استحکام خمشی بررسی و نتایج نشان داد با افزایش بار سرامیکی (از 10% تا 30% حجمی) هر دوی این پارامترها کاهش می یابند (میزان تخلخل از $61/2\%$ تا $50/41\%$ و استحکام خمشی از 79MPa تا $40/1\text{MPa}$) در پایان نیز از نمونه زینتر شده تصویر میکروسکوپ الکترونی تهیه شد.

واژه های کلیدی: ریخته گری ژله ای، کاربید تنگستن، منومر زنجیره ساز، منومر شاخه ساز، پراکنده ساز.

^۱ - کارشناسی ارشد مهندسی کامپوزیت دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

^۲ - دانشیار دانشکده مهندسی کامپوزیت دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

* - نویسنده مسوول مقاله: omid_yaghobi@yahoo.com

پیشگفتار

می‌باشد. تقریباً در تمامی تحقیق‌های انجام شده از آمونیوم پرسولفات (APS)^۸ به عنوان آغازگر و از ماده تترا متیل اتیلن دی آمید (TEMED)^۹ به عنوان کاتالیست فرآیند پلیمریزاسیون استفاده شده است.

در واقع تا قبل از اضافه شدن آغازگر فرآیند پلیمریزاسیونی رخ نخواهد داد، بعد از افزودن آغازگر منومرها به یکدیگر متصل شده و شبکه پلیمری سه بعدی تشکیل خواهد شد، بدون افزودن کاتالیست فرآیند تشکیل شبکه‌های پلیمری بسیار طولانی خواهد شد، کاتالیست با شکستن آمونیوم پرسولفات موجب تشکیل رادیکال آزاد شده و باعث می‌شود آغازگر با سرعت بیش‌تری به وظیفه خود عمل کند [۱]. کاربرد تنگستن یکی از مهمترین ذرات سرامیکی می‌باشد که به علت وجود خواصی مانند سختی، مقاومت سایشی و... مورد توجه مهندسان قرار گرفته است.

معمولاً این سرامیک در ساخت ابزارهای برشی به کار می‌رود [۱۱]. یکی از کاربردهای جدید این سرامیک ساخت کامپوزیت W-ZrC می‌باشد. این کامپوزیت از جمله مواد مقاوم در برابر حرارت به شمار می‌رود. یکی از روش‌های نوین تولید این کامپوزیت روش^{۱۰} DCP می‌باشد. در این روش پیش‌ماده^{۱۱} متخلخلی از کاربرد تنگستن ساخته شده و با مذاب حاوی زیرکونیوم رخنه‌دهی می‌شود تا کامپوزیت W-ZrC تولید شود [۲].

دو نکته مهم در تولید پیش‌ماده متخلخل کاربرد تنگستن با هدف استفاده در تولید کامپوزیت W-ZrC وجود دارد: اول اینکه فرآیند تفجوشی بدنه کاربرد تنگستن نباید به صورت کامل انجام شود، زیرا در این صورت ممکن است مقداری از تخلخل‌ها، بسته شوند و امکان نفوذ کامل مذاب حاوی زیرکونیوم به درون پریفورم از بین می‌رود، به همین منظور لازم است که عملیات تفجوشی در دمایی انجام شود تا تنها اتصالی بین ذرات کاربرد تنگستن برقرار شود و پدیده گلوبی شدن ذرات در حین تفجوشی رخ بدهد، طبق بررسی‌های انجام شده انجام عملیات تفجوشی

ریخته‌گری ژله‌ای فرایندی جدید و جذاب در علم سرامیک است که برای ساختن قطعات با کیفیت و اشکال پیچیده سرامیکی از آن استفاده می‌شود [۱]. در این روش دوغابی متشکل از پودر سرامیکی و منومرهای زنجیره‌ساز و شاخه‌ساز^۱ و حلال و آغازگر و کاتالیست تهیه و به داخل قالب ریخته می‌شود.

وجود آغازگر و کاتالیست باعث پلیمریزاسیون در جای منومرها شده و ذرات سرامیکی داخل شبکه سه بعدی پلیمری به دام می‌افتند، بعد از خشک شدن، ژل تولیدی از قالب خارج می‌شود و سپس ژل خشک شده به منظور حذف پلیمر و تفجوشی به داخل کوره منتقل می‌شود. این فرآیند یک فرایند عمومی و کلی است و مختص به استفاده از پودر سرامیکی خاصی نیست [۲].

در این فرآیند محدودیتی از نظر ابعاد قطعه وجود ندارد (برخلاف روش‌های بر پایه متالورژی پودر [۳]) و می‌توان قطعات ظریف با دقت بالا تا قطعات با ابعاد بزرگ مانند روتور توربین و رینگ‌های حلقوی را تولید کرد [۴]. از دیگر مزایای روش ریخته‌گری ژله‌ای نسبت به روش‌های سنتی تولید مواد سرامیکی، قابلیت تشکیل دوغابی با درصد بار جامد قابل توجه و استفاده از مواد آلی کمتر، استحکام خام نهایی بالاتر، در دسترس بودن مواد می‌باشد. در دهه اخیر تحقیقاتی در زمینه تولید بدنه‌های سرامیکی سیلیکون نیتريد [۵]، سیلیکون کاربرد [۶] و [۷] و آلومینا [۸] و... به روش ریخته‌گری ژله‌ای در سطح جهان انجام شده است.

مواد پلیمری که اغلب در این روش استفاده می‌شود شامل متاکریل آمید (MAM)^۲، آکریل آمید (AM)^۳ [۱۰]، هیدروکسی متیل آکریل آمید (HMAM)^۴، منو متاکریل آمید (MPEGMA)^۵ [۲] به عنوان منومرهای زنجیره‌ساز و متیلن بیس آکریل آمید (MBAM)^۶ [۹] و پلی اتیلن گلیکول دی متاکریلات^۷ (PEGDMA) [۲] به عنوان شاخه ساز

¹ - Cross-linker

² - Methacrylamide

³ - Acrylamide

⁴ - Hydroxy Methyl acrylamide

⁵ - Mono Methacrylamide

⁶ - Methylene Bisacrylamide

⁷ - Poly Ethylene glycol dimethacrylate

⁸ - Ammonium persulfate

⁹ - Tetra Methyl ethylene diamine

¹⁰ - Displasive Compensation of Prosimy

¹¹ - Preform

در دمای 1450°C برای ایجاد این شرایط مناسب می باشد [۲]. دومین نکته مهم این است که میزان تخلخل پیش ماده متخلخل نفش مهمی را در خواص نهایی کامپوزیت ایفا می کند، بنابر این تحت کنترل قراردادن میزان تخلخل نمونه ها یکی از پارامترهای مهم در تولید کامپوزیت نهایی می باشد.

طبق بررسی های انجام شده در مورد تولید قطعه سرامیکی کاربید تنگستن به روش ریخته گری ژله ای فعالیت های بسیار محدودی انجام شده است، به عنوان مثال در گزارش منتشر شده شده یان لی^۱ و همکارانش [۱۱] برای تولید قطعه کاربیدی از ماده ژل ساز تجاری و در پژوهش انجام شده توسط نجف زاده و همکارانش [۱۲] و [۱۳] از مواد پلیمرساز بر پایه آلزینات استفاده شده است که استحکام نمونه تولید شده به این روش بسیار پایین می باشد. بنابراین در این پژوهش تصمیم گرفته شد از روش ریخته گری ژله ای آکریلاتی برای تولید قطعه کاربید تنگستن استفاده شود. در این مقاله با استفاده از دستگاه رئومتر، خواص رئولوژی دوغاب تولیدی بررسی و میزان بهینه پراکنده ساز تعیین شد.

علاوه با انجام آنالیز حرارتی DTA/TG رفتار حرارتی نمونه ساخته شده بررسی و هم چنین تاثیر میزان بار سرامیکی روی ویسکوزیته دوغاب، تخلخل و استحکام خمشی نمونه نهایی بررسی شد. در نهایت نیز با استفاده از میکروسکوپ الکترونی^۲ ریز ساختار نمونه ها مورد مطالعه قرار گرفت.

برای انجام عملیات پیرولیز نمونه ها و تفجوشی نمونه ها از کوره تحت اتمسفر آرگون استفاده شد. کوره استفاده شده از نوع تیوبی (با قطر داخلی ۳۵ mm) بوده که جنس آن از آلومینا و دقت حرارتی و منطقه گرم آن نیز به ترتیب $1^{\circ}\text{C} \pm$ و 20°C می باشد.

به منظور بررسی رفتار حرارتی پلیمر در محدوده دمایی پیرولیز، آزمون DTA/TG استفاده شد تا مشخص شود فرآیند حذف آب و پلیمر در ساختار از چه دمایی شروع خواهد شد.

دستگاه آنالیز حرارتی مدل STA 409 PC Luxx، ساخت شرکت NETZSCH کشور آلمان بوده، سرعت گرمایش دستگاه قابل تنظیم و قابلیت کار با انواع اتمسفر دارا می باشد.

به منظور بررسی رفتار رئولوژیکی نیز از رئومتر چرخش MCR300 استفاده شد، برای محاسبه میزان تخلخل، مطابق استاندارد ASTM C20-00 نمونه ها به مدت ۵ ساعت در آب مقطر در حال جوشش و به مدت ۲۴ ساعت بدون اعمال حرارت در آب مقطر غوطه ور

در این مقاله ژل و از ماده آمونیوم پرسولفات (APS) و تترا متیلن اتیلن دی آمید (TEMED) محصول شرکت MERK به عنوان آغازگر و کاتالیست استفاده شد. از سیترات آمونیوم ساخت شرکت MERK نیز به عنوان پراکنده ساز و برای حل کردن منومرها از آب مقطر استفاده شد.

در این مقاله ژل و از ماده آمونیوم پرسولفات (APS) و تترا متیلن اتیلن دی آمید (TEMED) محصول شرکت MERK به عنوان آغازگر و کاتالیست استفاده شد. از سیترات آمونیوم ساخت شرکت MERK نیز به عنوان پراکنده ساز و برای حل کردن منومرها از آب مقطر استفاده شد.

در این مقاله ژل و از ماده آمونیوم پرسولفات (APS) و تترا متیلن اتیلن دی آمید (TEMED) محصول شرکت MERK به عنوان آغازگر و کاتالیست استفاده شد. از سیترات آمونیوم ساخت شرکت MERK نیز به عنوان پراکنده ساز و برای حل کردن منومرها از آب مقطر استفاده شد.

مواد و روش ها

در این مقاله ژل و از ماده آمونیوم پرسولفات (APS) و تترا متیلن اتیلن دی آمید (TEMED) محصول شرکت MERK به عنوان آغازگر و کاتالیست استفاده شد. از سیترات آمونیوم ساخت شرکت MERK نیز به عنوان پراکنده ساز و برای حل کردن منومرها از آب مقطر استفاده شد.

در شکل ۱ فلوجارت انجام فرآیند ریخته گری ژله ای به نمایش درآمده است. در مرحله اول منومرهای MAM و

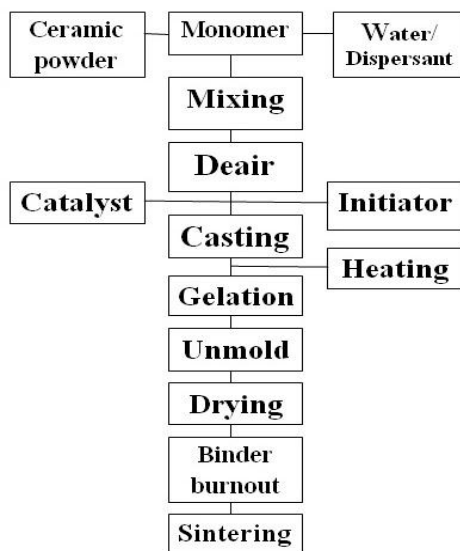
¹ - Yan Li

² - SEM

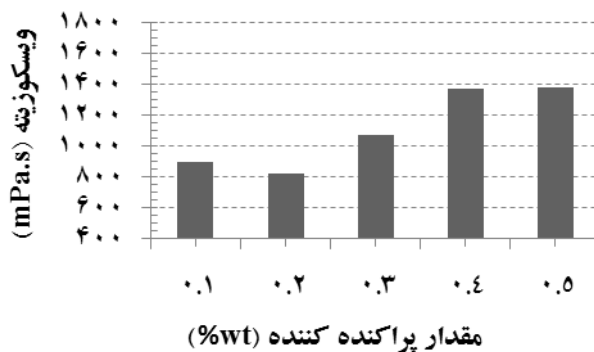
³ - Hot Zone

ماندند و پس از توزین و مقایسه وزن آنها قبل و بعد از غوطه‌وری، میزان تخلخل هر کدام از آنها محاسبه شد. در ادامه نیز به منظور بررسی تاثیر بار سرامیکی بر استحکام خمشی، نمونه‌ها بر اساس استاندارد ASTM C1161-02C

آماده و استحکام آنها تعیین شد. در نهایت نیز به منظور مشاهده ریز ساختار از میکروسکوپ الکترونی مدل VEGA\TESCAN-LMU استفاده شد.



شکل ۱- فلوچارت مراحل تولید قطعه به روش ریخته‌گری ژله‌ای [۱].



شکل ۲- نمودار اثر میزان پراکنده ساز (درصد وزنی بر حسب پودر تنگستن کاربرد) بر ویسکوزیته دوغاب.

نتایج و بحث

- بررسی رفتار رئولوژیکی سوسپانسیون

در فرایند ریخته‌گری ژله‌ای افزایش بار سرامیکی دوغاب باعث افزایش شدید ویسکوزیته خواهد شد، بنابراین دستیابی به دوغابی با حداقل ویسکوزیته امری مهم می‌باشد. زیرا ویسکوزیته پائین باعث می‌شود دوغاب ظرایف قالب را به خوبی پر کند.

بنابراین پیدا کردن مقدار بهینه پراکنده‌ساز به عنوان اصلی‌ترین عامل تاثیرگذار بر ویسکوزیته دوغاب یکی از مهمترین مراحل تولید قطعه به روش ریخته‌گری ژله‌ای خواهد بود.

اختلاط پودر سرامیکی در یک مایع قطبی نظیر آب منجر به تشکیل بارهای الکتریکی در فصل مشترک جامد و مایع می‌شود که این بار سطحی ناشی از جذب یا دفع گروه‌های یونی در محلول است.

برای دستیابی به محلولی پایدار با توزیع یکنواخت ذرات و ویسکوزیته تا حد امکان پائین، میزان دافعه بین ذرات کاربرد تنگستن بایستی افزایش یابد. جهت تعیین مقدار بهینه پراکنده‌ساز، دوغاب‌هایی با مقادیر مختلف از پراکنده‌ساز تهیه و ویسکوزیته آنها تعیین شد. نتایج به دست آمده در شکل ۲ به نمایش در آمده است.

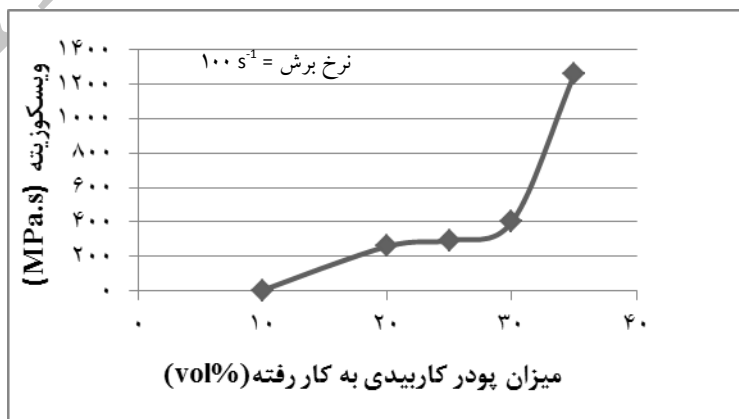
مشاهده می‌شود که مقدار کمینه ویسکوزیته که به معنای بهترین پراکندگی ذرات است، هنگامی بدست آمده که مقدار پراکنده‌ساز ۰/۰۴ گرم به ازای هر ۲۰ گرم پودر (معادل ۰/۲ درصد وزنی پودر سرامیکی) می‌باشد.

در مقادیر کم، با افزایش میزان پراکنده‌ساز در دوغاب به دلیل افزایش یافتن میزان بارهای همنام در سطح ذرات، نیروی دافعه الکترواستاتیکی ایجاد می‌شود و به مرور ذرات کلوخه شده از هم جدا می‌شوند، همزمان با این اتفاق ویسکوزیته دوغاب کاهش می‌یابد تا زمانی که سطح ذرات اشباع شوند.

در این شرایط است که ویسکوزیته کمترین مقدار را خواهد داشت و میزان پراکنده‌ساز بهینه می‌باشد. در مقادیر بیشتر نیز به دلیل افزایش بیش از حد یون‌های آزاد در محلول و مزاحمت این یون‌ها در برابر سیلان، ویسکوزیته مجدداً افزایش می‌یابد [۱۲].

در ادامه میزان ویسکوزیته حاصل شده به ازای مقادیر متفاوت بار سرامیکی در نمودار شکل ۳ به نمایش در آمده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش درصد حجمی سرامیک، ویسکوزیته دوغاب به سرعت افزایش می‌یابد. زمانی که میزان بار سرامیکی دوغاب زیاد می‌شود، فاصله بین ذرات کمتر می‌شود، بنابراین با کم شدن فاصله بین ذرات سیالی که قرار است از میان ذرات عبور کند فضای کمتری خواهد داشت.

پس طبیعی است که ویسکوزیته افزایش یابد، در واقع با بیش تر شدن بار سرامیکی فاصله بین ذرات، آنقدر کم شده که تقریباً به هم می‌چسبند و در این محدوده ویسکوزیته شدیداً افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج بدست آمده، می‌توان گفت که بیشینه میزان پودر کاربرد تنگستن که بدون داشتن مشکل جدی (در مورد ویسکوزیته) قادر خواهیم بود از آن استفاده کنیم میزان ۳۰ درصد حجمی می‌باشد.



شکل ۳- ویسکوزیته حاصل شده به ازای مقادیر متفاوت بار سرامیکی.

- ارزیابی رفتار حرارتی پلیمر

نتایج آنالیز حرارتی همزمان (DTA/TG) در شکل ۴ نشان داده شده است، سرعت گرمایش در این آزمایش $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ و اتمسفر محیط از نوع آرگون در نظر گرفته شد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در نمودار DTA پیک گرماگیری ناشی از خروج آب در دمای حدود 110°C مشاهده می‌شود.

هم‌چنین مشاهده می‌شود که پیک باریک و کوچکی در دمای 500°C وجود دارد که می‌تواند ناشی از حذف مواد پلیمری از ساختار باشد، در نمودار TG مشاهده می‌شود کاهش وزنی در محدوده دمایی 180°C تا 570°C رخ داده است که می‌تواند تاییدکننده فرایند تجزیه و خروج پلیمرها از ساختار باشد. عدم تغییر نمودار TG در دمای حدود 600°C نشان از حذف کامل پلیمرها تا این دما می‌باشد. در ضمن باید اشاره کرد از آنجایی که فرآیند در اتمسفر آرگون و بدون حضور اکسیژن صورت گرفته است حذف پلیمر و نمودار DTA به صورت پیک واضحی خود را نشان نمی‌دهد زیرا عدم حضور اکسیژن واکنش سوختن رخ نمی‌دهد و پدیده شکسته شدن پلیمر اتفاق می‌افتد.

- بررسی استحکام خمشی، میزان تخلخل و ریز ساختار نمونه‌ها

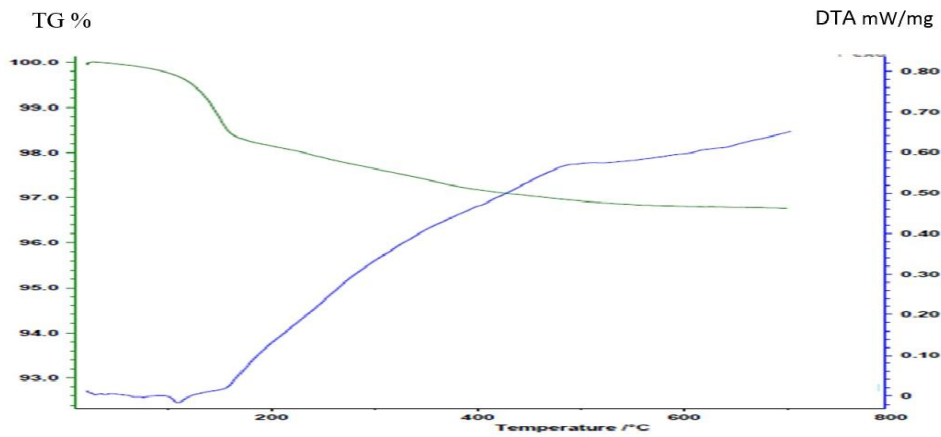
میزان تخلخل نمونه‌های حاوی بار سرامیکی مختلف در نمودار شکل ۵ به نمایش در آمده است، با افزایش بار سرامیکی از 10% تا 30% حجمی حلال میزان تخلخل نمونه‌ها از $61/2\%$ تا $50/41\%$ کاهش یافته است. در واقع با افزایش میزان بار سرامیکی در دوغاب، سهم مواد پلیمرساز کاهش یافته و بعد از تشکیل ژل و پیرولیز، میزان تخلخل‌های به جای مانده ناشی از حذف

مواد پلیمری کاهش می‌یابد. در نمودار شکل ۶ تغییرات استحکام خمشی نمونه‌های تفجوشی شده بر حسب میزان بار سرامیکی به نمایش درآمده است، مطابق نمودار با افزایش سهم بار سرامیکی در دوغاب (از 10% تا 30% حجمی حلال) استحکام خمشی نمونه‌ها از 79MPa به $40/1\text{MPa}$ افت کرده است.

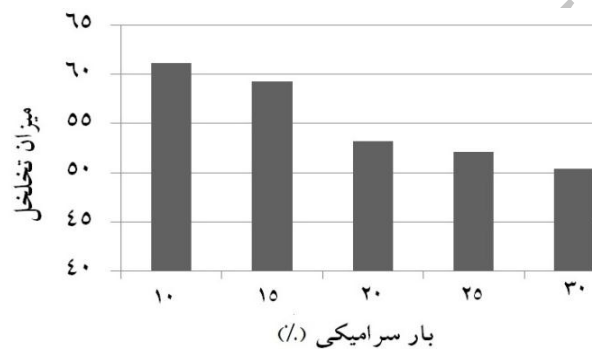
با افزایش بار سرامیکی در دوغاب به دلیل افزایش ویسکوزیته، توزیع یکنواخت ذرات مشکل‌تر شده و نتیجه آن به صورت عدم یکنواختی توزیع تخلخل‌ها از نظر سایز و پراکنده‌گی در ساختار نهایی بروز خواهد کرد، در نتیجه در هنگام اعمال نیرو در آزمون استحکام خمشی در نقاطی از نمونه تمرکز تنش بوجود می‌آید و به محض آنکه تنش به حد بحرانی برسد، ترکی تشکیل شده و رشد خواهد کرد. از آنجا که سرامیک‌ها دارای خواص تغییر شکل پلاستیک برای جذب انرژی منتقل شده نمی‌باشند، زمانی که ترکی ایجاد شود، رشد می‌کند تا هنگامی که منجر به شکست قطعه شود.

نتایج میکروسکوپ الکترونی نمونه حاوی 25% حجمی بار سرامیکی در ۲ بزرگنمایی در شکل‌های ۷ و ۸ به نمایش در آمده است. با توجه به اینکه تخلخل‌ها در قطعات تولید شده به این روش، اساساً از فضاهای میکرونی باقیمانده ناشی از خارج سازی مواد پلیمری و مواد افزوده شده در فرآیند نشات می‌گیرند. بنابراین نحوه توزیع تخلخل‌های بدست آمده می‌تواند نشان‌دهنده میزان یکنواختی دوغاب تهیه شده اولیه باشد.

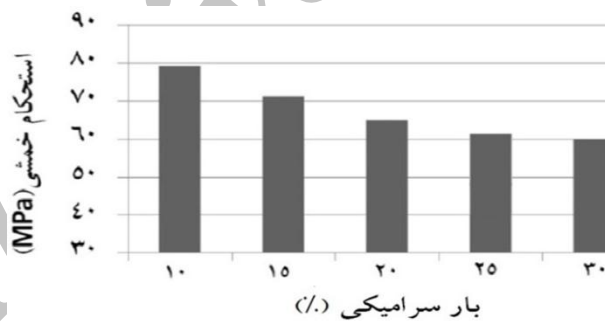
همان‌گونه که ملاحظه می‌شود بعد از انجام عملیات پیرولیز و تفجوشی، ساختار متخلخل شکل گرفته است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود پلیمرها به خوبی از ساختار خارج شده‌اند و با توجه به کم بودن نرخ حرارت دهی ترکی در زمینه بوجود نیامده است.



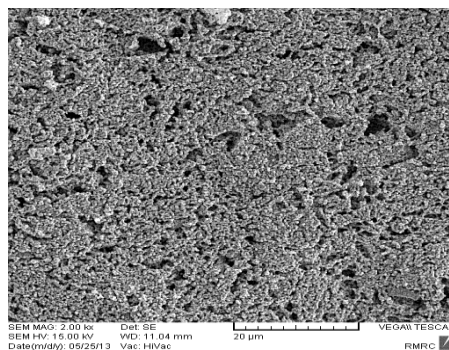
شکل ۴- بررسی رفتار حرارتی قطعه خام.



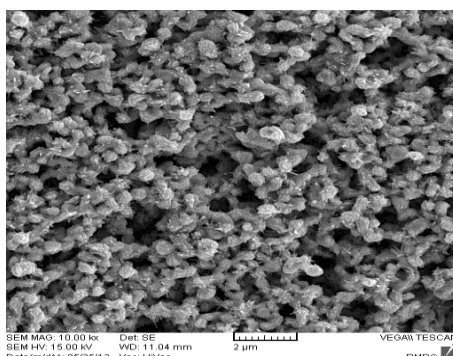
شکل ۵- تغییرات میزان تخلخل نمونه ها با تغییر بار سرامیکی.



شکل ۶- تغییرات استحکام خمشی نمونه ها با تغییر بار سرامیکی.



شکل ۷- تصویر میکروسکوپ الکترونی نمونه حاوی ۲۵٪ حجمی بار سرامیکی و تفجوشی شده در دمای ۱۴۵۰°C.



شکل ۸- تصویر میکروسکوپ الکترونی نمونه حاوی ۲۵٪ حجمی بار سرامیکی و تفجوشی شده در دمای ۱۴۵۰°C در بزرگنمایی متفاوت.

نتیجه گیری

- در این پژوهش مشخص شد تولید پریفورم متخلخل کاربرد تنگستن به روش ریخته‌گری ژله‌ای پایه آکریلاتی با سیستم منومری MAM-MBAM امکان پذیر می‌باشد.
- طبق نتایج بدست آمده میزان بهینه سیترات آمونیوم که به عنوان پراکنده ساز از آن استفاده شد، ۰/۰۴ گرم به ازای هر ۲۰ گرم پودر می‌باشد (حدود ۰/۲ درصد وزنی پودر) که در این مقدار دوغاب تولیدی حداقل ویسکوزیته را خواهد داشت.
- با افزایش میزان بار سرامیکی از ۱۰٪ تا ۳۰٪ حجمی حلال، ویسکوزیته دوغاب از ۴/۲۷MPa.s تا ۱۲۶۰MPa.s افزایش می‌یابد.
- طبق نتایج آنالیز حرارتی فرآیند حذف آب در دمایی نزدیک به ۱۱۰°C و فرآیند حذف پلیمر از میان ذرات کاربرد تنگستن تا دمای نزدیک به ۶۰۰°C به پایان می‌رسد.
- با افزایش میزان بار سرامیکی از ۱۰٪ تا ۳۰٪ حجمی حلال، میزان تخلخل نمونه‌ها از ۶۱/۲٪ تا ۵۰/۴۱٪ کاهش و استحکام خمشی نمونه‌ها به مرور افت می‌کند.

Reference

1. A. Janney, D. Nunn, and A. Wallss, "Gelcasting", hand book of ceramic engineering, oak Ridge National laboratory, 1980.
2. M. Dickerson, P. Wurm, J. Schorr, W. Hoffman, P. Wapner, and KH. Sandhage, "Near net-shape, ultra-high melting, recession-resistant ZrC/W-based rocket nozzle liners via the displacive compensation of porosity (DCP) method". Journal of materials science, Vol. 39, pp. 6005- 6015, 2004.
۳. ر. ثانی، ع. بیت‌اللهی، "بررسی تحولات فازی نانو ذرات فریت کبالت تهیه شده به روش فعال سازی مکانیکی محدود و عملیات حرارتی در مقایسه با روش سنتی متالورژی پودر" فصلنامه علمی پژوهشی مواد نوین، دوره چهارم، شماره ۲، ص. ۳۱-۴۰، زمستان ۱۳۹۲.
۴. م. حاجی، م. علیزاده، ت. عمادزاده، "ساخت و بررسی ویژگی‌های نانو کامپوزیت Al_2O_3/Ag به روش ژل کست" مجله مواد نانو کامپوزیتی، سال ۲، ص. ۶۳-۷۱، سال ۱۳۸۸.
5. J. Yu, H. Wang, and J. Zhang, "Gelcasting preparation of porous silicon nitride ceramics by adjusting the content of monomers", J Sol-Gel Technol, Vol. 53, pp. 515-523, 2010.
6. M. Vlajic, and V. Krstic, "Strength and machining of gelcasting SiC Ceramics", Journal of Materials Science, Vol. 37, pp. 2943-2947, 2002.
7. J. Yu, H. Wang, and H. Zeng, "Effect of monomer content on physical properties of silicon nitride Ceramic green body prepared by gelcasting",

- carbide”, International Journal of Refractory and Hard Material , Vol. 26, pp. 472-477, 2008.
12. A. Najafzadeh Khoee, A. Habibolahzadeh, F. Qods, and H. Baharvandi, “Fabrication of tungsten carbide foam through gel-casting process using nontoxic sodium alginate”, Inter J Refract Met H, Vol. 43, pp. 115–20, 2014.
۱۳. ع. نجف زاده، ع. حبیب الله زاده، ف. قدوسی، ح. بهاروندی، "ساخت فوم کاربید تنگستنی به روش ریخته گری ژله ای با پایه آلژینات سدیم" دومین همایش بین المللی و هفتمین همایش مشترک انجمن مهندسی متالورژی ایران و انجمن علمی ریخته گری ایران، دانشگاه سمنان، سال ۱۳۹۲.
- Ceramic International, Vol. 35, pp. 1039-1044,
8. S. Dhara, R. Kamboj, and M. Pradhan, “shape forming of ceramics via gelcasting of aqueous particulate slurries”, Bull. Mater Sci, Vol. 25, pp. 565-568, 2002.
9. B. Chen, Z. Zhang, J. Zhanj, and D. Jiang, “fabrication and mechanical properties of TCP pieces by gel-casting method”, Materials Science and Engineering C, Vol. 22, pp. 1-5, 2007.
10. D. Gou, K. Cai, L. Li, and Z. Gui, “Gelcasting of PZT”, Ceramics international, Vol. 29, pp. 403-406, 2003.
11. Y. Li, and Z. Gue, “Gel casting of WC-8wt%Co tungsten cemented

Archive of SID