



پوشش دهی ذرات آلومینا با لایه نازکی از ترموپلاست‌های آمورف به روش وارونگی فاز جهت استفاده در روش تفجوشی لیزری انتخابی غیرمستقیم

سید محمود ناظم السادات¹، محسن بدرسمای²، احسان فروزمهر^{3*}

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان
2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان
3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان
* اصفهان، صندوق پستی 84156-83111، eforoozmehr@cc.iut.ac.ir

چکیده

تفجوشی لیزری انتخابی غیرمستقیم یکی از روش‌های ساخت افزودنی می‌باشد که می‌تواند برای ساخت قطعات پیچیده و موادی مثل سرامیک‌ها که دارای نقطه ذوب بالایی هستند و با روش‌های مرسوم تولیدشان سخت و یا غیرممکن می‌باشد، استفاده شود. در این تحقیق پوشش دهی ذرات پودر آلومینای کروی با لایه نازکی از ترموپلاست آمورف پلی‌استایرن و پلی‌متیل متاکریلات به روش وارونگی فاز بررسی شده است. سپس به ارزیابی پوشش توسط میکروسکوپ الکترونی روشی، آنالیز طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز، آنالیز توزین حرارتی و آنالیز گرماسنجی افتراقی پرداخته شده است. در نهایت با استفاده از مقادیر مناسب پارامترهای فرآیند و همچنین انتخاب ذرات پودر آلومینا با نازک‌ترین پوشش ترموپلاست آمورف، قطعات سبز جهت اثبات امکان استفاده از روش تفجوشی لیزری تولید گردید. نتایج نشان داد که به دلیل جذب کمتر انرژی لیزر Nd: YAG توسط آلومینا، پلی‌متیل متاکریلات و پلی‌استایرن باعث افزایش عمق نفوذ لیزر به داخل بستر پودر می‌شود. علاوه بر این، علی‌رغم ایجاد کمترین میزان پوشش ترموپلاست آمورف بر روی ذرات آلومینا، امکان اتصال بین ذرات در هر جهت به دلیل یکنواختی پوشش ترموپلاست میسر شد.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 10 اسفند 1396
پذیرش: 19 فروردین 1397
ارائه در سایت: 07 اردیبهشت 1397

کلید واژگان:

پوشش دهی

آلومینا

تفجوشی لیزری

پلی‌استایرن

پلی‌متیل متاکریلات

Preparation of Alumina Particles Coated with a Thin Layer of Amorphous Thermoplastic via Phase Inversion Process for Indirect Selective Laser Sintering Applications

Sayed Mahmoud Nazemosadat¹, Mohsen Badrossamay², Ehsan Foroozmehr^{3*}

Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
* P.O.B. 84156-83111, Isfahan, Iran, eforoozmehr@cc.iut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 01 March 2018
Accepted 08 April 2018
Available Online 27 April 2018

Keywords:

Coating
Alumina
Laser Sintering
Polystyrene
Polymethyl methacrylate

ABSTRACT

Indirect selective laser sintering is one of the interesting methods of integrated manufacturing which could be used for manufacturing of complicated pieces and certain materials such as ceramics with a high melting point and difficult manufacturing process through typical methods. In this study, an innovative phase inversion technique is used to fabricate spherical alumina particles coated with thin layer of amorphous thermoplastic (PMMA and PS). Then, the coating was evaluated by scanning electron microscopy, analytical results of Fourier transform infrared spectroscopy and thermogravimetric analysis and differential scanning calorimetry. Finally, 3D green parts were then fabricated using proper process parameters and selection of alumina powder particles with thinnest amorphous thermoplastic coating as a proof of the feasibility of using SLS technique. The results showed that using a Nd:YAG laser with less absorption by alumina, PMMA and PS provides greater penetration through a powder bed. In addition, the possibility of sound connections among particles in every direction was observed due to the uniformity of the amorphous thermoplastic coating in spite of the minimal amount of thermoplastic binder on alumina particles.

1- مقدمه

کنده‌کاری، لحیم‌کاری، حکاکی، ریز ماشین‌کاری، ساخت افزودنی¹ (لایه نشانی مواد، استریولیتوگرافی، تفجوشی و ذوب لیزری بستر پودر)، اندازه‌گیری، عملیات تراز و غیره استفاده می‌شود [1-4]. تفجوشی لیزری

امروزه از لیزرها به‌عنوان ابزاری مهم و توانمند در فرآیندهای ساخت و تولید نظیر برش کاری، سوراخ کاری، جوش کاری، پوشش کاری، سخت کاری،

¹ Additive manufacturing (AM)

و تولید قطعه سبز، حذف ماده پلیمری با تفجوشی در کوره و تولید قطعه قهوه‌ای می‌باشد. در گذشته مواد آلی مختلفی برای تولید قطعات سرامیکی به روش تفجوشی لیزری انتخابی استفاده می‌شد که شامل موم‌ها (اسید استاریک)، گرماسخت‌ها (اپوکسی‌رزین)، گرمانرم‌های شبه‌کریستالی (پلی-آمید¹²، پلی‌آمید¹¹ و پلی‌پروپیلن²) و گرمانرم‌های آمورف (پلی‌متیل-متاکریلات³ و پلی‌استایرن⁴) می‌باشد [9]. پلیمرها را می‌توان از دیدگاه واکنش حرارتی به دو دسته گرمانرم⁵ و گرماسخت⁶ تقسیم‌بندی می‌شوند. مواد گرما-نرم با حرارت نرم شده و با سرد شدن تا دمای اتاق جامد می‌شوند. این نرم و سخت شدن ممکن است چندین بار تکرار گردد. مواد گرماسخت امکان این که دوباره حرارت ببینند و مجدداً نرم شوند، را ندارند و برای یک بار که شبکه ساختمانی تثبیت شد دیگر قابل تغییر شکل نیستند. اساساً پلیمرهای گرمانرم از نظر ساختمان کریستالی به دو دسته بی‌شکل یا آمورف⁷ و نیمه‌کریستالی⁸ تقسیم‌بندی می‌شوند. مزیت اصلی پلیمرهای گرمانرم آمورف نسبت به نیمه کریستالی را می‌توان این‌گونه ذکر کرد که پلیمرهای آمورف به دلیل نداشتن نقطه ذوب (نقطه‌ای که در آن نظم کریستالی در اثر گرما به‌طور کامل تخریب می‌شود) هنگام انجماد دچار انقباض ناگهانی و شدید نمی‌شوند و دارای پایداری ابعادی و هندسی مناسبی می‌باشند، اما برخلاف آن‌ها، پلیمرهای نیمه‌کریستال مطابق "شکل 1" در دمای T_m دچار انقباض ناگهانی می‌گردند. بنابراین استفاده از پلیمرهای آمورف به‌عنوان پوشش ذرات سرامیک یا چسب اتصال‌دهنده ذرات برای تولید قطعات سرامیکی به روش تفجوشی لیزری انتخابی به دلیل پایداری هندسی و ابعادی بیشتر در مرحله سوختن ماده پلیمری که ناشی از انبساط حرارتی کم آن‌هاست، مناسب‌تر از پلیمرهای نیمه‌کریستالی یا گرماسخت می‌باشند [10].

پلیمرهای آمورف، ویسکوزیته نسبتاً بالا در حالت مایع، انرژی نسبتاً پایین، واکنش‌پذیری پایین نسبت به اکثر گازها و هدایت حرارتی پایینی دارند. در هر حال اثر خواص مواد پلیمری از قبیل وزن ملکولی، ویسکوزیته مذاب، نرخ تبلور و اندازه پودر، بر روی خواص مکانیکی و کیفیت قطعات تفجوشی شده لیزری، یکی از جمله مهمترین فاکتورها است که هنگام توصیف پلیمرها در تفجوشی لیزری انتخابی بایستی در نظر گرفته شود

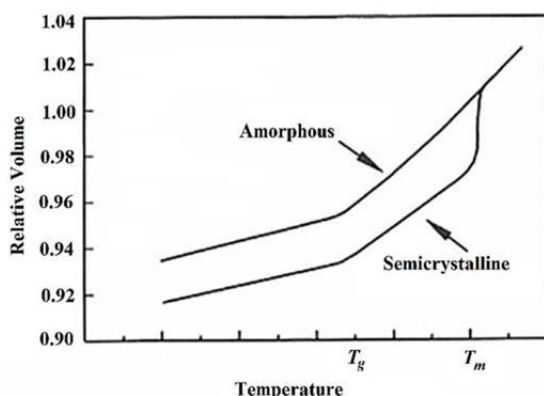


Fig. 1 Comparison of the relative volume of amorphous and semi-crystalline polymers [6]

شکل 1 مقایسه حجم نسبی پلیمرهای آمورف و نیمه‌کریستالی [6]

¹Polyamide (PA)

²Polypropylene (PP)

³Polymethyl Methacrylate (PMMA)

⁴Polystyrene (PS)

⁵Thermoplastic

⁶Thermoset

⁷Amorphous

⁸Semi-crystalline

انتخابی یکی از فرآیندهای ساخت‌افزودنی می‌باشد که با استفاده از لیزر، پودرهای فلزی، پلیمری، کامپوزیتی و سرامیکی را یکپارچه می‌سازد و بدون نیاز به سازه کمکی، زیر لایه، قالب، و پیش‌فرم جهت تولید قطعات پیچیده استفاده می‌شود. این فرآیند در سال 1988 به‌وسیله دکارد و همکاران اختراع و ثبت شد. مدل‌سازی سریع، نمونه‌سازی با شرایط طراحی، تولید قطعات سازه‌ای و غیرسازه‌ای، تولید لوازم زینتی و جواهرات سفارشی، تولید قطعات یدکی کوچک که نیاز به تیراژ تولید پایینی دارند، فرآیندهای طراحی و ساخت محصولات کاملاً سفارشی شده توسط مشتریان، چاپ سه‌بعدی تجهیزات الکترونیکی هواپیماها به‌طور مستقیم، از کاربردهای رایج امروزی تفجوشی لیزری محسوب می‌شوند. همچنین در کاربردهای پزشکی نیز از این تجهیزات برای ساخت سریع و سفارشی ایمپلنت‌ها، چاپ پروتزهای درمانی برای پیوند عضو و یا بستری برای توسعه بافت‌های انسانی برای درمان‌های پزشکی استفاده می‌شوند. فرآیند تفجوشی لیزری انتخابی برای ذرات پودر فلزی و پلیمرها به‌طور گسترده مطالعه و بررسی شده است و نتیجه آن تولید قطعات فلزی و پلیمری به‌صورت تجاری می‌باشد [5]. اما به علت پیچیدگی فرآوری لیزری ذرات پودر سرامیکی، تفجوشی لیزری انتخابی سرامیک‌ها هنوز به‌طور کامل تجاری‌سازی نشده و در حال تحقیق و بررسی می‌باشد. سرامیک‌ها به علت مقاومت پایین در برابر شوک حرارتی، دمای ذوب بالا و شکل‌پذیری کم نسبت به پلیمرها و فلزات دارای چالش‌های فرآوری بیشتری می‌باشند. فرآیندهای تولید مرسوم سرامیک‌ها، دارای محدودیت‌هایی زیادی هستند، که از آن جمله می‌توان به عدم توانایی آن‌ها در تولید قطعات پیچیده اشاره کرد. نقطه ذوب بالای سرامیک‌ها، فرآوری مستقیم آن‌ها با تفجوشی لیزری انتخابی مشکل می‌سازد.

در سال‌های اخیر سرامیک‌های شفاف توجه بسیاری از محققین را به خود جلب کرده‌اند. کاربردهای اصلی این گروه از سرامیک‌ها شامل: لیزر، ابزار برش، وسایل دید در شب و دریچه‌های شفاف می‌باشد. آلومینا یکی از موادی می‌باشد که به دلیل کاربردهای گسترده مهندسی، بسیار مورد توجه قرار گرفته است و به جرات می‌توان از آن به‌عنوان مهمترین سرامیک مهندسی نام برد. محققین توانستند آلومینای پلی‌کریستال شفاف با چگالی بالا و عاری از عیوب تولید کنند [6]. اخیراً تولید سرامیک‌های شفاف یا نیمه‌شفاف به کمک روش تفجوشی لیزری انتخابی میسر شده است [7]. این فرآیند عموماً به دو دسته تفجوشی لیزری انتخابی مستقیم که در آن قطعات در یک مرحله ساخته می‌شوند، و تفجوشی لیزری غیرمستقیم که در آن قطعات در دو یا چند مرحله تولید می‌شوند، تقسیم‌بندی می‌شود. در تفجوشی لیزری انتخابی مستقیم سطح بیرونی ذرات پودر ذوب شده و مانند چسب باقی‌مانده ذرات پودر جامد را به هم متصل می‌کند. بنابراین از این روش به دلیل دمای ذوب بالای ذرات پودر سرامیک و ماهیت ترد آن‌ها نمی‌توان برای تولید قطعات سرامیکی استفاده کرد. اما در تفجوشی لیزری غیرمستقیم به دلیل استفاده از اتصال‌دهنده پلیمری جهت ایجاد ارتباط بین ذرات پودر می‌توان برای تولید قطعات سرامیکی استفاده نمود.

تفجوشی لیزری انتخابی غیرمستقیم شامل ذوب مواد پلیمری و تولید قطعه سبز در مرحله اول و حذف پلیمر از قطعه در کوره و تولید قطعه قهوه‌ای در مرحله بعدی می‌باشد. این فرآیند برخلاف روش مستقیم می‌تواند باعث تولید قطعات بدون ترک شود [8] و برای تولید محدوده وسیعی از قطعات سرامیکی می‌تواند استفاده گردد. از طرف دیگر تفجوشی لیزری انتخابی غیرمستقیم با پودر پوشش داده شده یک فرآیند چند مرحله‌ای است که شامل پوشش‌دهی ذرات پودر، پردازش از طریق تفجوشی لیزری انتخابی

می‌شود. برهم‌کنش بین لیزر و پودر دمای آن را تا نقطه ذوب بالا می‌برد که باعث چسبیدن ذرات به یکدیگر می‌گردد البته امکان استفاده از پیشگرم سطح پودر قبل از فرآیند اسکن لیزر هم وجود دارد. باقیمانده ذرات پودر تفجوشی نشده جهت نگهداشتن قطعه در حین ساخت به کار می‌رود. هنگامی که ساخت سطح مقطع لایه اول به پایان رسید، محفظه ساخت به اندازه ضخامت لایه پایین می‌رود و غلتک لایه دیگری را بر روی لایه اسکن شده قبلی می‌گستراند. این لایه جدید، بعداً به صورت مستقیم بر روی لایه قبلی تفجوشی می‌شود و این فرآیند آنقدر ادامه می‌یابد تا قطعه کامل شود. امروزه، روش‌های ساخت افزودنی (AM) یک تکنولوژی شناخته شده برای ساخت قطعات واقعی سه بعدی می‌باشند که این قطعات ممکن است از جنس فلز، سرامیک، پلاستیک یا ترکیبی از آن‌ها باشد [17]. در اصل، تمام موادی که می‌توانند ذوب یا تفجوشی شوند، در فرآیند تفجوشی لیزری استفاده می‌شوند [18].

در این فرآیند جهت لایه نشانی مناسب، ذرات پودر بایستی براحتی بتوانند حرکت کنند بنابراین استفاده از ذرات پودر کروی در این فرآیند ارجحیت دارد [19]. تولید ذرات پودر سرامیکی کروی با پوشش نازک ماده پلیمری باعث ایجاد قابلیت سیلان و حرکت مناسب ذرات در حین فرآیند لایه نشانی و تولید قطعه سبز همگن با انقباض ابعادی و اعوجاج هندسی کمتر و چگالی بیشتر به روش تفجوشی لیزری انتخابی می‌شود.

روش‌های مختلفی جهت تولید ذرات پودر کامپوزیتی (ترکیب ماده ساختاری مثل پودر سرامیک و چسب پلیمری فداشونده) وجود دارد: الف) استفاده از روش اختلاط دو نوع پودر (سرامیک و پلیمر) ب) استفاده از ذرات کامپوزیتی با ساختار میکرونی سرامیک - پلیمر و ج) استفاده از ذرات ساختاری پوشش داده شده با یک لایه نازک از چسب پلیمری (ذرات کامپوزیت هسته-پوسته) [9]. در هر یک از روش‌های فوق الذکر، استفاده از پودر کروی به دلیل قابلیت سیلان بهتر ذرات پودر کروی نسبت به سایر هندسه‌های دیگر پودر، ترجیح داده می‌شود [19]. اولین روش بسیار کاربردی است و تنها نیاز به مخلوط کردن پودر سرامیک با پودر چسب آلی می‌باشد. با این حال، یکنواخت بودن وجود چسب در سرتاسر مخلوط یک چالش است و نیاز به مقدار نسبتاً بالایی از چسب می‌باشد. روش دوم، اطمینان از حضور چسب در اطراف ذرات سرامیکی را تضمین می‌کند، اما در مقایسه با روش سوم، به مقدار بیشتری چسب پلیمری نیاز دارد. سومین روش، یعنی ذرات کامپوزیت هسته-پوسته، حضور چسب پلیمری را در اطراف هر تک ذره سرامیکی با کمترین مقدار اتصال دهنده تضمین می‌کند. علاوه بر این، اگر از پودر کروی استفاده شود، این روش باعث جذب بالا و یکنواخت

[11]. مواد پلیمری رایج و در دسترس برای تفجوشی لیزری انتخابی شامل پلی‌استایرن، پلی‌کربنات‌ها، نایلون‌ها و پلی‌متیل متاکریلات می‌باشند. پلی-استایرن و پلی‌متیل متاکریلات از مهمترین و رایج‌ترین پلیمرهای مورد استفاده در تکنولوژی ساخت افزودنی می‌باشد [12].

زنگ و همکاران [13] آماده‌سازی نانوذرات کامپوزیتی هسته-پوسته آلومینا/ پلی‌استایرن (50 nm) را به روش پلیمریزاسیون امولسیون از ذرات آلومینا سوزنی شکل گزارش کردند. کاردون و همکاران [5] کپسوله کردن آلومینا را با پلی‌استایرن، حاوی 30 و 39 درصد وزنی پلی‌استایرن گزارش کردند. شهزاد و همکاران [8] همچنین فرآیند وارونگی فاز² را که برای تولید 50 و 60 درصد حجمی پلی‌آمید به‌عنوان یک پوشش در اطراف ذرات آلومینا گزارش کردند. مراجع [14,8,5] از لیزر دی‌اکسیدکربن³ برای فرآیند تفجوشی لیزری انتخابی استفاده کردند. چسب پلیمری دارای مقدار زیادی جذب در طول موج لیزر دی‌اکسیدکربن است. بنابراین، عمق نفوذ لیزر به بستر پودر بسیار محدود است. در نتیجه، برای اتصال موثر بین ذرات، چسب پلیمری باید ذوب شود و باید ذرات زیرین را مرطوب کند. این مفهوم نیاز به استفاده از مقدار زیادی از چسب پلیمری دارد. استفاده از مقدار زیاد چسب پلیمری، موجب انقباض بیشتر در هنگام از بین بردن چسب در کوره و تفجوشی قطعه در کوره و همچنین تخلخل بیشتر قطعه نهایی می‌شود. یکی از راه‌های غلبه بر این مسئله استفاده از لیزری مانند لیزر نئودیمیم: گارنت آلومینیوم یتیریم⁴ و لیزر فایبر⁵ می‌باشد زیرا سرامیک‌ها و پلیمرها در این طول موج لیزر، جذب انرژی کمتری دارند [7]. در چنین مواردی جذب لیزر می‌تواند به اندازه کافی بزرگ باشد تا لایه نازک پلیمری پوشش داده شده اطراف ذرات سرامیکی را ذوب کند و ذرات سرامیکی را به هم متصل سازد. در این تحقیق، از لیزر نئودیمیم: گارنت آلومینیوم یتیریم جهت افزایش عمق نفوذ لیزر در بستر پودر استفاده شده است.

تکنیک‌های اصلی پلیمریزاسیون عبارتند از: امولسیون، تعلیق، و پلیمریزاسیون پراکندگی. ذرات پودر کامپوزیتی کروی می‌توانند مستقیماً به روش‌های مختلفی از قبیل پلیمریزاسیون پراکندگی، پلیمریزاسیون تعلیقی و وارونگی فاز تولید شوند. زنگ و همکاران [13] کپسوله کردن نانوذرات آلومینای سوزنی شکل با پلی‌استایرن از طریق پلیمریزاسیون امولسینی را گزارش دادند. کاردون و همکاران [15] از فرآیند پلیمریزاسیون پراکندگی برای تولید قطعات آلومینا از طریق تفجوشی لیزری انتخابی غیرمستقیم استفاده کرد. دوگوت و همکاران [16] کپسوله کردن میکرو ذرات آلومینا کروی را از طریق پلیمریزاسیون تعلیقی بررسی کردند. شهزاد و همکاران [8] تولید پودر کامپوزیتی میکروکروی آلومینا- پلی‌آمید را به به‌وسیله تکنیک جدید وارونگی فاز گزارش کردند.

"شکل 2" تصویر شماتیک از سیستم تفجوشی لیزری انتخابی با مکانیزم لایه نشانی غلتکی را برای ایجاد لایه‌های متوالی و پی‌درپی جهت تولید قطعه نشان می‌دهد. در این فرآیند با استفاده از پرتو لیزر (عمدتاً CO₂)، لنز $f-\theta$ (جهت تمرکز پرتوی لیزر با کمترین انحراف بر روی بستر پودر) و به‌واسطه اسکن سطح مقطع قطعه مطابق فایل STL، ماده پودری زینتر یا ذوب می‌شود. جهت تولید هر لایه، ابتدا پودر ماده خام به‌وسیله مکانیزم غلتکی درون محفظه ساخت گسترانده شده سپس سطح مقطع قطعه به‌وسیله حرکت لیزر روی سطح اسکن می‌شود و مطابق طرح، لایه ایجاد

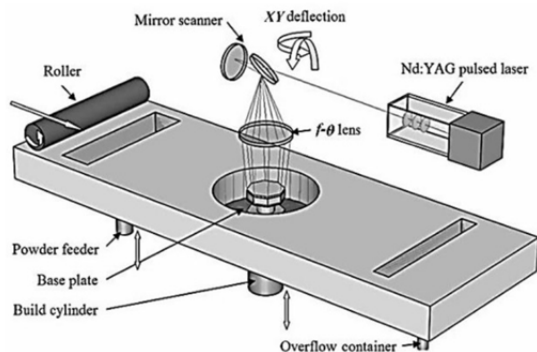


Fig. 2 SLS system configuration [9]

شکل 2 تصویر شماتیک از سیستم تفجوشی لیزری انتخابی [9]

⁹ Polycarbonate (PC)

¹ Phase Inversion Process (PIP)

² CO₂ Laser

³ Nd:YAG Laser

⁴ Fiber Laser

پلی‌استایرن نیست و نمی‌تواند این پلیمر را به‌طور کامل در خود حل کند. اتیل‌استات، بنزن و تولوئن پلی‌استایرن را بخوبی در خود حل نمودند اما استنشاق آن باعث تحریک ریه می‌شد و بسیار مضر و سرطان‌زا است [21]. کلروفرم یک محلول بی‌هوشی است و استنشاق آن باعث تهوع و بی‌هوشی فرد می‌گردد اما حلال خوبی برای پلی‌استایرن است و بخوبی آن را در خود حل کرد. بنابراین می‌توان گفت، بهترین حلال دی‌کلرومتان است که پلی‌استایرن را بخوبی در خود حل می‌کند و اثرات تحریکی بسیار کمتر از بنزن، تولوئن و اتیل‌استات بر روی ریه دارد. ضمناً تمامی این حلال‌ها برای پلی‌متیل‌متا-کریلات آزمایش گردید و نتیجه به‌دست آمده این بود که استون حلال این پلیمر نیست. بنزن و تولوئن و اتیل‌استات به سختی مقدار کمی از آن را در خود حل کردند و حلال مناسبی نیستند. کلروفرم قابلیت حل آن را دارد اما زمان زیادی جهت حل کامل آن نیاز دارد. بهترین حلال دی‌کلرومتان بود که در مدت زمان کم این ماده پلیمری را در خود بخوبی حل نمود.

2-3- فرآیند وارونگی فاز و تولید ذرات پودر آلومینا با پوشش پلیمری

روش‌های مختلفی جهت تولید ذرات پودر سرامیکی کروی با پوشش پلیمر وجود دارند که شامل: پلیمریزاسیون پراکنشی، امولسیون، تعلیقی و فرآیند وارونگی فاز می‌باشد. فرآیند فرآیند وارونگی فاز شامل 1- حل پلیمر در یک حلال مناسب به‌وسیله اختلاط، حرارت و افزایش فشار 2- با سرد شدن، کاهش فشار و تبخیر حلال یا اضافه کردن یک ناحلال، به پلیمر اجازه رسوب از محلول داده می‌شود [22]. طرح شماتیکی از مراحل مختلف جهت اجرای فرآیند وارونگی فاز در تولید ذرات پودر آلومینا با پوشش نازک پلیمری در "شکل 3" نشان داده شده است. این مراحل شامل حرارت‌دهی، همزدن مکانیکی، خنک‌کردن، شستن، جداسازی و خشک کردن ذرات پودر می‌باشد.

2-3-1- فرآیند پوشش‌دهی آلومینای کروی با پلی‌استایرن

جهت انجام عملیات پوشش‌دهی و تعیین میزان درصد وزنی پلی‌استایرن به آلومینا برای ایجاد پوششی به ضخامت 400nm به محاسبه مقدار حجم پوشش موردنیاز بر روی پودر آلومینا با قطر متوسط 100µm پرداخته شد. سپس برای پوشش‌دهی، این مقدار پلی‌استایرن را در حلال دی‌کلرومتان حل نموده. این محلول هنگام پوشش‌دهی با دی‌کلرومتان که میزان آن چهار برابر حجم آلومینا می‌باشد بر روی صفحه داغ² که در دمای 130 درجه سانتی‌گراد تنظیم شده است برای مدتی هم‌زده می‌شود تا محلول یکنواختی حاصل

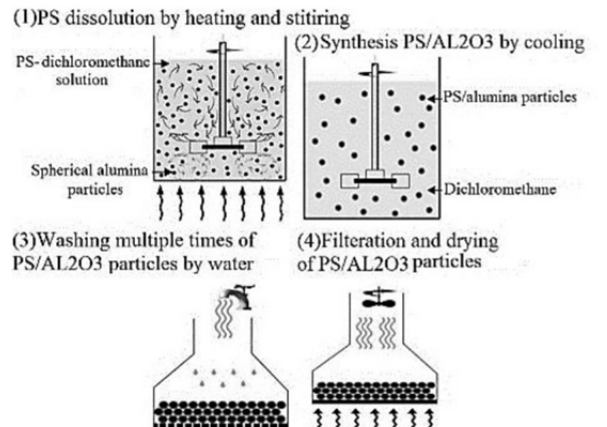


Fig. 3 Schematic presentation of powder coating system [9]

شکل 3 تصویر شماتیک روش پوشش‌دهی پودر [9]

² Hot plate

انرژی لیزر با عمق نفوذ بیشتر لیزر در بستر پودر و سیلان بهتر پودر در هنگام رسوب لایه در فرآیند تف‌جوشی لیزری انتخابی می‌شود. این باعث فشرده‌تر شدن پودر، و در نتیجه آن باعث چگالی بیشتر و انقباض کمتر قطعه می‌شود [9]. با توجه به موارد فوق‌الذکر و همچنین با توجه به عدم بررسی و تحقیق در منابع گذشته پیرامون پوشش‌دهی ذرات کامپوزیتی هسته - پوسته به روش وارونگی فاز، در این تحقیق، روش سوم یعنی فرآیند پوشش‌دهی ذرات پودر کروی آلومینا با پوشش بسیار نازک از پلی‌متیل‌متاکریلات و پلی‌استایرن به روش وارونگی فاز مطالعه و بررسی شده است. مورفولوژی ذرات پوشش داده شده، دمای تبدیل شیشه‌ای پوشش، درصد وزنی پوشش و کیفیت پیوند فیزیکی بین پوشش پلی‌متیل‌متاکریلات و پلی‌استایرن با ذرات آلومینا مورد مطالعه قرار گرفته شده است. در نهایت جهت تأیید امکان ساخت قطعات به-روش تف‌جوشی لیزری غیرمستقیم از این ذرات، با به‌کارگیری بهترین پارامترهای لیزر، نمونه‌هایی از قطعات سبز ساخته شد و مورفولوژی سطح بالایی و جانبی‌شان مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت.

2- جزئیات روش آزمایشگاهی

2-1- مواد

مواد موردنیاز جهت ایجاد پوشش و تولید آلومینای کروی با پوشش ترموپلاست آمورف شامل: آلومینای α (SAB-30)، شرکت تولید مواد کروی شانگ‌های چین - 30µm (d50) که به‌عنوان ماده ساختاری استفاده شده است. پلی‌استایرن انبساطی¹ (ساخت ایران) و پلی‌متیل‌متاکریلات، ساخت ایران) که به‌عنوان چسب و پوشش نازک پلیمری استفاده شده است و دی‌کلرومتان (شرکت مجللی - ساخت ایران) به‌عنوان حلال در این تحقیق استفاده شده است.

2-2- تعیین بهترین حلال برای پلی‌استایرن و پلی‌متیل‌متاکریلات

یکی از روش‌های تشخیص پلیمرها انجام آزمایش‌هایی برای محلول یا نامحلول بودن آن‌هاست. به‌طورکلی پلیمرها در حلالی با پارامتر حلالیت مشابه و یا کمتر حل می‌گردد. "جدول 1" برخی از پلیمرها و حلال‌ها را براساس پارامتر حلالیت‌شان نشان می‌دهد.

در این تحقیق پلی‌استایرن و پلی‌متیل‌متاکریلات با حلال‌های مختلف آزمایش شدند و اثرات هر کدام از حلال‌ها بر روی پلی‌استایرن و پلی‌متیل‌متا-کریلات بررسی شد. مشاهدات نشان دادند که استون حلال خوبی برای

جدول 1 پلیمرها و شناسایی حلال‌های آن براساس پارامتر حلالیت [20]

Table 1 Polymers and identification of solvents based on solubility parameter [20]

پارامتر حلالیت	حلال	پارامتر حلالیت پلیمر	پلیمر
حلال	حلال	پارامتر حلالیت	پلیمر
23.4	آب	9.7-8.5	پلی‌استایرن
9.3	کلروفرم	9.5-9	پلی‌متیل‌متاکریلات
9.7	دی‌کلرومتان	13.6	پلی‌امید
9.8	اتیلن‌دی‌کلراید	8.1-7.9	پلی‌اتیلن
10	استون	11	اپوکساید
9	تولوئن	7.9	پلی‌پروپیلن
9.1	اتیل‌استات	11.2-7	الکید
9.2	بنزن		

¹ Expanded Polystyrene (EPS)

7-2- آزمایشات تفجوشی لیزری انتخابی غیرمستقیم

قطعات سبز با استفاده از یک سیستم تفجوشی لیزری (آزمایشگاه لیزر و اپتیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران) مجهز به لیزر پالسی لیزر نئودیمیم: گارنت آلومینیوم یتیروم (با طول موج 1.064 میکرومتر و قطر پرتوی لیزر 400 میکرومتر)، محفظه ساخت و سیستم لایه‌نشانی چند منظوره می‌باشد. آزمایشات تک لایه روی لایه‌هایی به ضخامت 2 میلی‌متر از ذرات آلومینای پوشش داده شده با پلیمرهای آمورف انجام شد. فاصله اسکن 25 و 50 میکرومتر، قدرت لیزر از 2 تا 7 وات، فرکانس پالس از 1 تا 50 کیلوهرتز، پهنای پالس از 0.5 تا 50 میکروثانیه و سرعت اسکن از 50 تا 150 میلی‌متر بر ثانیه متغیر است. پارامترهای مناسب لیزر جهت ساخت نمونه‌ها شامل: سرعت لیزر 100mm/s، فاصله اسکن 0.05mm، توان لیزر 6W و قطر پرتوی لیزر 0.4mm می‌باشد. پس از تعیین پارامترهای مناسب، تولید قطعات سه بعدی انجام شد. تراکم نسبی قطعات با استفاده از روش ارشمیدس براساس استاندارد ASTM B962-17 اندازه گیری شد.

3- نتایج

1-3- فرآیند وارونگی فاز

مورفولوژی ذرات پودر آلومینای کروی با پوشش پلی‌متیل‌متاکریلات و پلی‌استایرن توسط میکروسکوپی الکترون روبشی⁵ مطالعه گردید. تصاویر میکروسکوپی الکترون روبشی از ذرات آلومینا پوشش داده شده به روش وارونگی فاز در "شکل‌های 4 و 5" نشان از پوشش یکنواخت، مناسب و با لایه نازکی (ضخامت کمتر از 400nm) از پلی‌استایرن و پلی‌متیل‌متاکریلات دارد. "شکل‌های (6-a) و (7-a)" تصویر ذرات پودر آلومینای کروی با پوشش پلی‌استایرن و پلی‌متیل‌متاکریلات بعد از جداسازی دستی و "شکل‌های

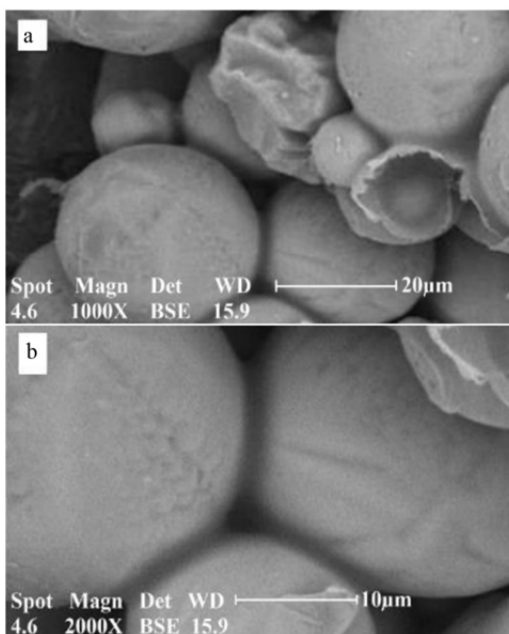


Fig. 4 SEM micrograph of the 4 wt% PS coated spherical alumina composite powders after manually crashed with a mesh size sieve of 88 μm at low (a) and high (b) magnification.

شکل 4 تصویر میکروسکوپی الکترون روبشی از پودر آلومینای کروی (SA-B-30) با پوشش 4 درصد وزنی پلی‌استایرن پس از جداسازی به صورت دستی با اندازه مش 88 μm (a) با بزرگنمایی کم (b) بزرگنمایی زیاد

⁵ Scanning Electron Microscope (SEM)

گردد. سپس پودر آلومینا به محلول اضافه شده و به مدت 10min بر روی صفحه داغ در دمای 130 درجه سانتی‌گراد و به‌طور همزمان، توسط همزن با دور 400rpm هم زده می‌شود. بعد از گذشت 10min صفحه داغ خاموش شده و همزن تا سرد شدن محلول تا دمای محیط به هم‌زدن محلول ادامه می‌دهد. پس از اتمام پروسه، ظرف محتوی آلومینا و محلول را جهت جداسازی دی‌کلرومتان در زیر سیستم مکش قرار داده تا محتوای داخل ظرف خشک شود. سپس جهت حذف باقیمانده دی‌کلرومتان از ذرات پودر آلومینای تشکیل شده با پوشش پلی‌استایرن، ابتدا آنرا چندین بار با آب یا اتانول شسته و سپس جهت خشک کردن آن‌ها را در داخل خشک‌کن¹ به مدت 4 ساعت در دمای 90 درجه سانتی‌گراد قرار داده می‌شود تا پودر آلومینای پوشش‌دار تهیه گردد.

2-3-2 پوشش دهی پودر آلومینای کروی با پلی‌متیل‌متاکریلات

جهت تهیه پلی‌متیل‌متاکریلات (برای پوشش دهی آلومینای کروی) از ورق‌های پلی‌متیل‌متاکریلات که قطعات حجم داده شده از جنس پلی‌متیل‌متاکریلات می‌باشند، استفاده شده است. پروسه تولید پوشش پلی‌متیل‌متاکریلات نیز مانند پلی‌استایرن می‌باشد با این تفاوت که چون ورق پلی‌متیل‌متاکریلات در حلال دی‌کلرومتان مدت زمان خیلی زیادتری نسبت به پلی‌استایرن طول می‌کشد تا حل گردد. بنابراین حداقل 24 ساعت قبل از شروع فرآیند پوشش دهی بایستی پلی‌متیل‌متاکریلات را در این حلال قرار داد تا محلول یکنواختی حاصل گردد سپس شروع به فرآیند پوشش دهی نموده تا پودر آلومینا با پوشش پلی‌متیل‌متاکریلات ایجاد شود.

4-4-2 آنالیز طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز²

آنالیز طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز برای پودر آلومینا و پودر آلومینای پوشش داده شده با پلی‌متیل‌متاکریلات و پلی‌استایرن بوسیله طیف‌سنج تبدیل فوریه مادون قرمز مطابق استاندارد ASTM E 1252-13 انجام شده است.

5-5-2 گرماسنجی روبشی تفاضلی³

در این تحقیق از دستگاه گرماسنجی روبشی تفاضلی مدل DSC200 F3Maia تحت اتمسفر نیتروژن به میزان 50 میلی‌لیتر بر دقیقه استفاده شد. تقریباً 12.9 میلی‌گرم از مواد نمونه در یک سینی صاف قرار داده شد و نمونه‌ها تا دمای 150 درجه سانتی‌گراد با نرخ گرمایش 5 درجه سانتی‌گراد در دقیقه حرارت دهی شدند. دمای تبدیل‌دشیشه‌ای مواد، توسط نرم‌افزار گرماسنجی روبشی تفاضلی به دست می‌آید.

6-2- آنالیز توزین حرارتی⁴

در این تحقیق آنالیز توزین حرارتی برای پودر آلومینای کروی با پوشش نازک پلی‌متیل‌متاکریلات و پلی‌استایرن به وسیله دستگاه آنالیز توزین حرارتی تحت اتمسفر نیتروژن انجام شد. نمونه‌ها تا دمای 600 درجه سانتی‌گراد با نرخ گرمایش 10 درجه سانتی‌گراد در دقیقه حرارت داده شدند. از نرم‌افزار آنالیز توزین حرارتی برای تعیین درصد تغییر جرم و درصد وزنی پوشش پلی‌متیل‌متاکریلات و پلی‌استایرن کشیده شده بر ذرات آلومینا استفاده شده است.

¹ Oven

² Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

³ Differential Scanning Calorimetry (DSC)

⁴ Thermogravimetric Analysis (TGA)

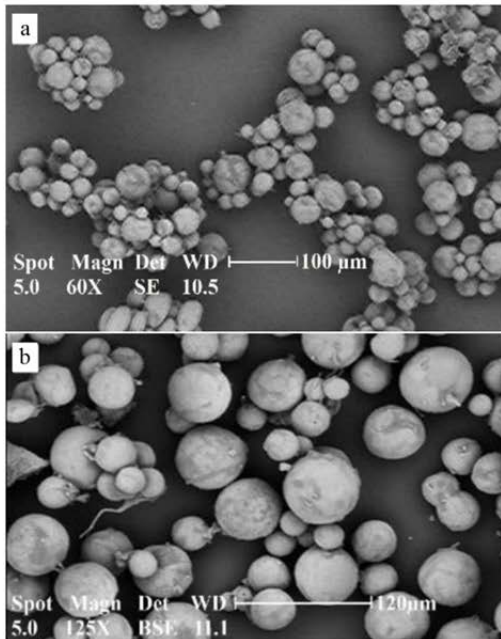


Fig. 7 SEM micrograph of (a) Manually crushed Al₂O₃/3 wt% PMMA powder and (b) Ballmilled ground and sieved powder with a mesh size sieve of 88 μm.

شکل 7 تصویر میکروسکوپی الکترون روبشی از پودر آلومینای کروی (SA-B-30) با پوشش 3 درصد وزنی پلی‌متیل‌متاکریلات (a) پس از جداسازی ذرات بصورت دستی (b) پس از آسیاب گلوله‌ای با اندازه مش 88μm

2-3- نتایج آنالیز طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز

همان‌طور که در "شکل 8" نشان داده شده است طیف آنالیز طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز نمونه آلومینای پوشش داده شده با پلی‌متیل-متاکریلات در مقایسه با آلومینای خام دارای پیک‌های جدیدی در 1200.06 و 1733.13cm^{-1} می‌باشد که می‌تواند به ترتیب مربوط به پیوند C-O و C=O باشد. همچنین طیف آنالیز طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز نمونه آلومینای پوشش داده شده با پلی‌استایرن در مقایسه با آلومینای خام دارای پیک‌های جدیدی در 1492.03، 1600.05 و 2920cm^{-1} می‌باشد که می‌تواند به ترتیب مربوط به پیوند C=C، C=O و ارتعاشات کششی پیوند C-H اشباع شده باشد [13, 24, 23]. پیک‌های نشان داده شده در طیف آنالیز طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز آلومینا با پوشش پلی‌متیل-متاکریلات و پلی‌استایرن می‌تواند از اتصال شیمیایی در فصل مشترک بین آلومینا و پلی‌متیل‌متاکریلات یا فصل مشترک بین آلومینا و پلی‌استایرن گواهی دهد [13]. تفاوت در پیک‌های نشان داده شده در طیف‌سنجی تبدیل فوریه پلی‌متیل‌متاکریلات و پلی‌استایرن نشان از تفاوت پیوند این پلیمرها با آلومینا دارد. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد در پیوندهای برقرار شده بین پلی‌استایرن و آلومینا به دلیل تشکیل پیوند C=C و بیشتر بودن انرژی پیوند آن نسبت به پیوند C-O، پیوند برقرار شده بین پلی‌استایرن و آلومینا قوی تر از پیوند پلی‌متیل‌متاکریلات و آلومینا می‌باشد

3-3- نتایج دستگاه گرماسنجی روبشی تفاضلی

آزمایش گرماسنجی روبشی تفاضلی جهت تعیین خواص حرارتی، مناسب بودن و رفتار پردازشی پودر کامپوزیتی در فرآیند تف-جوشی لیزری انتخابی استفاده شده است. "شکل 9" منحنی گرماسنجی روبشی تفاضلی را برای 12.9 میلی‌گرم آلومینای پوشش داده شده با پلی‌متیل‌متاکریلات و

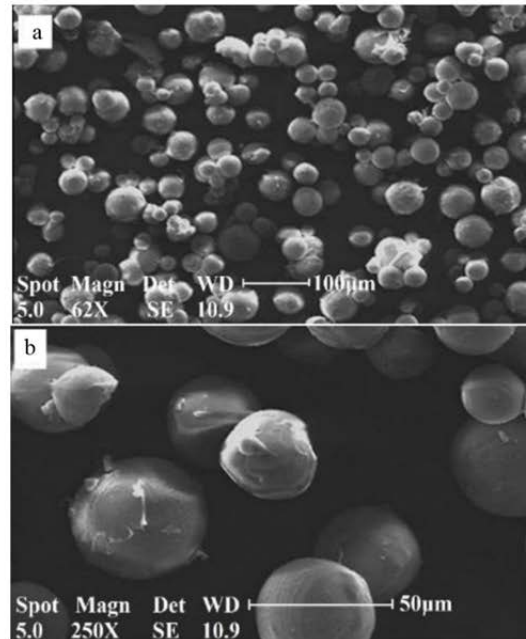


Fig. 5 SEM micrograph of the 3 wt% PMMA coated spherical alumina composite powders after ball milled ground and sieved powder with a mesh size sieve of 88 μm at low (a) and high (b) magnification.

شکل 5 تصویر میکروسکوپی از پودر آلومینای کروی (SA-B-30) با پوشش 3 درصد وزنی پلی‌متیل‌متاکریلات پس از آسیاب گلوله‌ای شدن با اندازه مش 88μm (a) با بزرگنمایی کم (b) بزرگنمایی زیاد

(6-b) و (7-b)" تصویر این ذرات را پس از جداسازی با آسیاب گلوله‌ای نشان می‌دهد. ذرات پودر آلومینا با پوشش پلی‌استایرن و پلی‌متیل‌متاکریلات و با درصد‌های وزنی 2، 3، 4، 6، 10، 15 هر کدام به میزان 200 گرم تولید شدند.

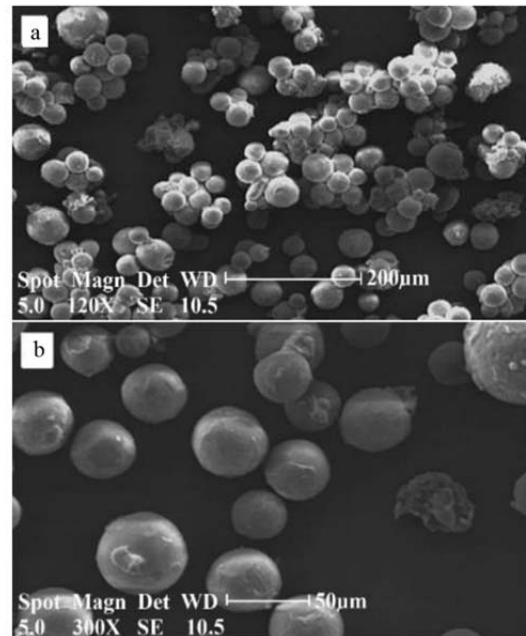


Fig. 6 SEM micrograph of (a) Manually crushed Al₂O₃/4 wt% PS powder and (b) Ballmilled ground and sieved powder with a mesh size sieve of 88 μm.

شکل 6 تصویر میکروسکوپی الکترون روبشی از پودر آلومینای کروی (SA-B-30) با پوشش 4 درصد وزنی پلی‌استایرن (a) پس از جداسازی ذرات بصورت دستی (b) پس از آسیاب گلوله‌ای با اندازه مش 88μm

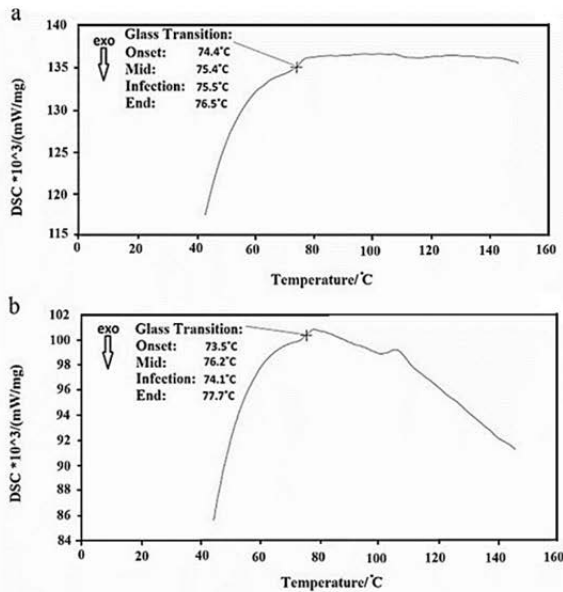


Fig. 9 DSC result for 12.9 mg batch. (a) PMMA/alumina composite particles (b) PS/alumina composite particles (heating cycle in a temperature range of 25–150 °C)

شکل 9 نتایج گرماسنجی روبشی تفاضلی برای نمونه 12.9 میلی گرمی ذرات آلومینا (SA-B-30) با پوشش پلی‌متیل متاکریلات (a) پلی‌استایرن (سیکل حرارت‌دهی در محدوده دمایی 25 تا 150 درجه)

پلی‌استایرن به ترتیب 380 و 420 درجه نشان می‌دهد و مقدار اتلاف جرم را از مشتق اول اتلاف جرم نسبت به دما محاسبه می‌کند. مطابق نتایج توزین حرارتی، 12.9 میلی‌گرم از ماده شامل 3.03 درصد وزنی پلی‌متیل متاکریلات و 12.6 میلی‌گرم از ماده شامل 3.69 درصد وزنی پلی‌استایرن می‌باشد. در آزمایش توزین حرارتی، در صورتی که دمای دو رویداد حرارتی، نزدیک به هم باشد، جدا کردن آن‌ها در منحنی تغییر وزن بر حسب دما مشکل خواهد بود. از طرفی در منحنی‌های توزین حرارتی نمی‌توان دمای آغاز و پایان یک رویداد حرارتی را به آسانی مشخص کرد. این دو مشکل باعث شده اند که با اضافه کردن یک قسمت الکترونیکی به دستگاه توزین حرارتی، بتوان مشتق منحنی وزن برحسب دما را رسم کرد. این حالت را مشتق توزین حرارتی¹ می‌نامند. مشتق توزین حرارتی نمونه با منحنی توزین حرارتی در "شکل 10" مشخص شده است. در واقع منحنی‌های توزین حرارتی در "شکل 10" نشان‌دهنده میزان متوسط پوشش 3.03 درصد وزنی پلی‌متیل متاکریلات و 3.69 درصد وزنی پلی‌استایرن بر روی ذرات آلومینا می‌باشد و این نشان دهنده مطابقت این مقادیر با درصد‌های وزنی در نظر گرفته شده در فرآیند پوشش‌دهی به روش وارونگی فاز (3 درصد وزنی پلی‌متیل متاکریلات و 4 درصد وزنی پلی‌استایرن) می‌باشد.

3-5- تولید قطعه سبز سه بعدی از طریق تف‌جوشی لیزری انتخابی

پس از انجام فرآیند وارونگی فاز جهت تولید ذرات پودر آلومینا با پوشش نازک پلیمرهای گرمانرم آمورف، و بررسی خصوصیات حرارتی، پیوند، مورفولوژی و تعیین درصد وزنی پلیمر، ساخت قطعاتی از این‌گونه پودرها به روش تف‌جوشی لیزری انتخابی انجام شد. رفتار تف‌جوشی ذرات پودر آلومینای پوشش‌دهی شده با پلی‌متیل متاکریلات و پلی‌استایرن با درصد‌های وزنی 3,2,4,6,10,15 بررسی شد. مطابق "شکل 11" هر چند که با افزایش

¹ Derivative Thermogravimetry (DTG)

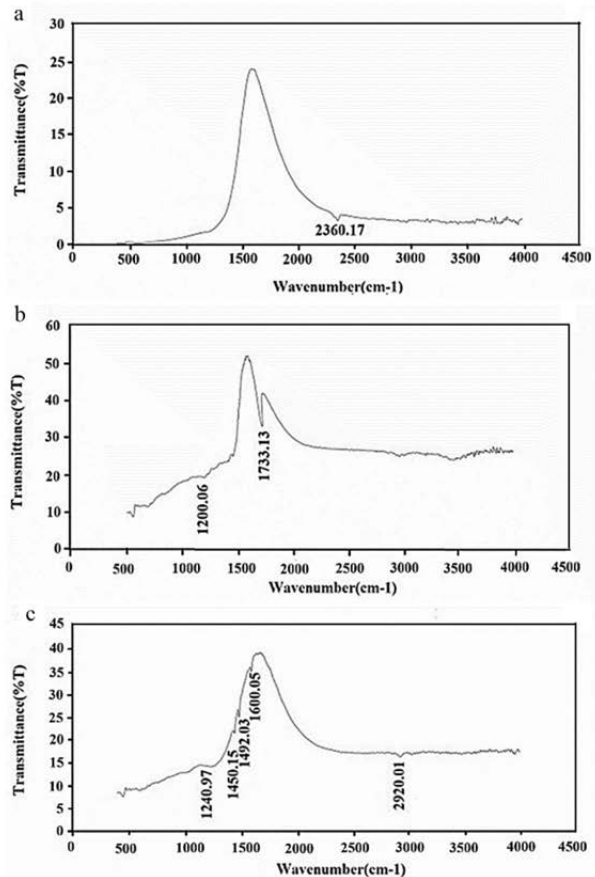


Fig. 8 FT-IR spectra of raw alumina (a), PMMA/alumina composite particles (b) and PS/alumina composite particles (c)

شکل 8 نمودار FT-IR از: (a) ذرات آلومینا (SA-B-30) ذرات آلومینا با پوشش پلی‌متیل متاکریلات (c) ذرات آلومینا با پوشش پلی‌استایرن

پلی‌استایرن نشان می‌دهد. نمونه‌های آلومینای پوشش داده شده برای به‌دست آوردن دمای تبدیل شیشه‌ای‌شان آنالیز می‌شوند. در حین سیکل گرمایش اولیه دمای تبدیل شیشه‌ای برای پلی‌متیل متاکریلات 75.4 و برای پلی‌استایرن تقریباً 76.2 درجه سانتی‌گراد به‌دست آمد. این نشان‌دهنده نزدیک بودن میزان دمای تبدیل شیشه‌ای این دو نوع پلیمر دارد. در واقع دمای تبدیل شیشه‌ای تابعی از میانگین وزن ملکولی و طول زنجیر پلیمری M_n می‌باشد [25]. استفاده از سیکل ثانویه گرمایش (تف‌جوشی لیزری) در نمونه‌ها باعث افزایش دمای تبدیل شیشه‌ای می‌شود. افزایش دمای تبدیل شیشه‌ای مربوط به عدم تحرک زنجیره پلیمری بر روی سطح آلومینا باشد. این امر نشان می‌دهد لایه پایداری از پلی‌استایرن یا پلی‌متیل متاکریلات در حین فرآیند SLS تشکیل می‌شود. افزایش دمای بستر پودر در حین فرآیند SLS باعث انعطاف‌پذیری بیشتر زنجیره پلیمری شده و امکان افزایش دمای تبدیل شیشه‌ای به دمای بالاتر نسبت به مرحله پوشش‌دهی ذرات پودر را فراهم می‌کند. این لایه پایدار باعث ایجاد چسبندگی بهتر ذرات آلومینا بعد از تف‌جوشی لیزری و در نتیجه تولید قطعات سبز مقاوم و پایدار می‌گردد [9].

3-4- نتایج آنالیز توزین حرارتی

"شکل 10" نمودارهای توزین حرارتی از ذرات پودر آلومینا با پوشش پلی‌متیل متاکریلات و پلی‌استایرن را نشان می‌دهد. نمودار توزین حرارتی اتلاف جرم به علت تجزیه را در دمای واپسپارش برای پلی‌متیل متاکریلات و

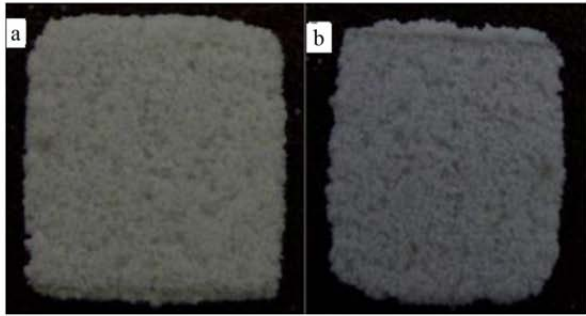


Fig. 11 Optical micrographs of the sintered samples at pulse frequency of 10 kHz, and pulse width of 10 μ s, $V = 100$ mm/s, $P=6$ W, (a) 15%wtPS/AL₂O₃, and (b) 4%wt PS/AL₂O₃.

شکل 11 تصویر نمونه‌های تف جوشی شده با قطر پرتوی 400 میکرومتر، فروکانس 10 کیلوهرتز، پهنای پالس 10 میکروثانیه، فاصله خطوط اسکن 0.05 میلی‌متر، سرعت اسکن 100 میلی‌متر بر ثانیه و توان لیزر 6 وات (a) برای ذرات آلومینا با پوشش 15 درصد وزنی پلی‌استایرن (b) برای ذرات آلومینا با پوشش 4 درصد وزنی پلی‌استایرن

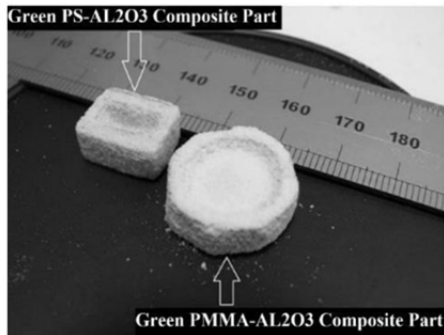


Fig. 12 Complex green parts created with indirect SLS by using one of the best laser parameters (Frequency: 10 kHz, Pulse width: 10 μ s, laser power: 6 W, scan speed: 100 mm s⁻¹).

شکل 12 قطعات سبز پیچیده ساخته شده به روش تف جوشی لیزری انتخابی غیرمستقیم با به کارگیری یکی از بهترین پارامترهای لیزر (فروکانس: 10 کیلوهرتز، پالس عرض: 10 میکروثانیه، توان لیزر: 6 وات، سرعت اسکن: 100 میلی‌متر بر ثانیه).

مورفولوژی سطح بالای نمونه‌ها و "شکل‌های 14 و 16" مورفولوژی سطح جانبی نمونه‌ها را در بزرگنمایی کم و زیاد نشان می‌دهند. مشاهدات میکروسکوپی الکترون روبشی در این تصاویر نشان از کیفیت خوب تف جوشی لیزری نمونه‌ها می‌باشد. اتصال بین ذرات پودر آلومینا از ذوب پوشش‌های نازک پلی‌متیل متاکریلات و پلی‌استایرن، کاهش ویسکوزیته و جریان یکنواخت آن‌ها بین ذرات پودر حاصل می‌شود. با اندازه‌گیری ملاحظه می‌شود که میانگین ضخامت گردن اتصال تنها چند میکرومتر است. برخلاف مطالعات قبلی شهزاد [8]. از ویژگی‌های این میکروساختار می‌توان تخلخل کمتر، انقباض ابعادی و اعوجاج کمتر از نمونه تف جوشی شده به علت پوشش لایه‌های نازک پلی‌متیل متاکریلات و پلی‌استایرن (کمتر از 400 نانومتر) بر روی آلومینا نام برد. ذوب جزئی پوسته بسیار نازک ذرات پودر بر اساس جذب سطح خارجی برای تولید یک حوضچه ذوب بزرگ جهت اتصال بیشتر ذرات پودر آلومینا بهم کافی نیست. اما به علت شفافیت ذرات پودر در طول موج 1064 نانومتر و خاصیت لنزگونه بودن ذرات آلومینا، عمق نفوذ لیزر و در نتیجه عمق نفوذ حرارت افزایش می‌یابد.

4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق امکان ایجاد پوشش مناسب، یکنواخت و بسیار نازک

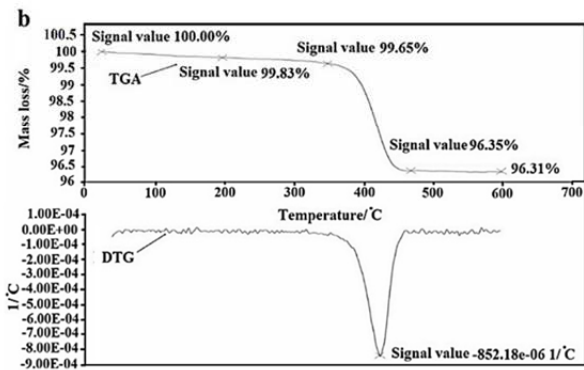
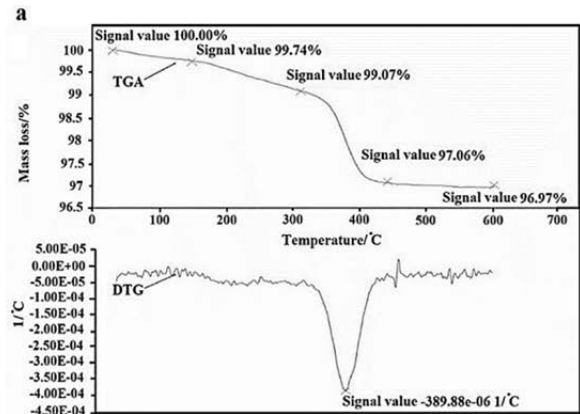


Fig. 10 Mass loss as a result of extended heating (a) PMMA/alumina composite particles (b) PS/alumina composite particles

شکل 10 اتلاف جرم در اثر گسترش حرارت در نمونه آلومینا با پوشش (a) پلی‌متیل - متاکریلات و (b) پلی‌استایرن

درصد وزنی پوشش پلیمری بر روی ذرات آلومینا، قطعات سبز مستحکم‌تری تولید می‌شود اما این امر باعث اعوجاج و انقباض ابعادی بیشتر بعد از حذف ماده پلیمری در کوره و تولید قطعه قهوه‌ای اعوجاج یافته می‌گردد. بنابراین هدف بررسی امکان ایجاد پوشش پلیمری با کمترین ضخامت بر روی ذرات آلومینا می‌باشد. آلومینای با پوشش 2 درصد وزنی ترموپلاست آمورف، پیوند خیلی ضعیف جهت اتصال ذرات آلومینا به روش تف جوشی لیزری انتخابی ایجاد می‌کند. لذا جهت تولید قطعات سرامیکی با ابعاد و هندسه دقیق‌تر کمترین درصد وزنی پوشش‌دهی ممکن، برابر 4 درصد وزنی برای پلی‌استایرن و 3 درصد وزنی برای پلی‌متیل متاکریلات انتخاب شد. "شکل 12" دو نمونه تولید شده از قطعات سبز با 3 و 4 درصد وزنی ترموپلاست آمورف به روش تف جوشی لیزری انتخابی را نشان می‌دهد.

6-3- مشاهدات میکروسکوپی الکترون روبشی

مشاهدات ریزساختار نمونه‌های تف جوشی شده توسط میکروسکوپی الکترون روبشی، رفتار تف جوشی ذرات آلومینای کروی پوشش داده شده با پلی‌متیل - متاکریلات و پلی‌استایرن را نشان می‌دهد. که "شکل‌های 13 و 14" مربوط به نمونه تولید شده از ذرات آلومینا با پوشش پلی‌متیل متاکریلات و "شکل‌های 15 و 16" مربوط به نمونه تولید شده از ذرات آلومینا با پوشش پلی‌استایرن می‌باشد. نمونه‌ها توسط لیزر نفوذی میم: گارنت آلومینیوم یتیریم پالسی با فروکانس 10 کیلوهرتز، پهنای پالس 10 میکروثانیه، سرعت اسکن 100 میلی‌متر بر ثانیه، قطر پرتوی 0.4 میلی‌متر، فاصله خطوط اسکن 0.05 میلی‌متر و ضخامت لایه 0.4 میلی‌متر ایجاد شده‌اند. "شکل‌های 13 و 15"

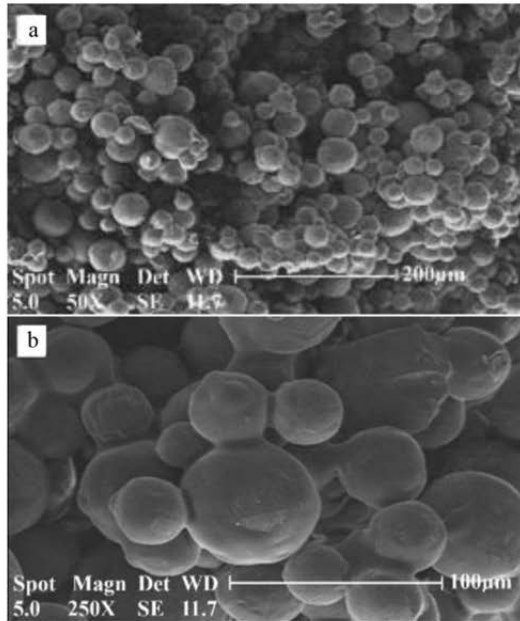


Fig. 15 SEM observations of the sintered sample (produced from 4 wt% PS/alumina powder particles) for top view at low (a) and high (b) magnification.

شکل 15 تصویر میکروسکوپی الکترون روبشی از سطح بالایی قطعات سبز ساخته شده از ذرات آلومینا با پوشش 4 درصد وزنی پلی‌استایرن در بزرگنمایی (a) کم و (b) زیاد.

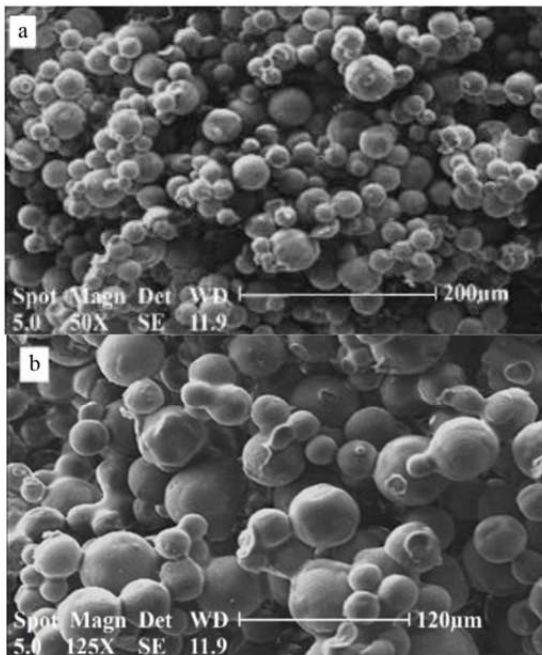


Fig. 16 SEM observations of the sintered sample (produced from 4 wt% PS/alumina powder particles) for side view at low (a) and high (b) magnification

شکل 16 تصویر میکروسکوپی الکترون روبشی از سطح جانبی قطعات سبز ساخته شده از ذرات آلومینا با پوشش 4 درصد وزنی پلی‌استایرن در بزرگنمایی (a) کم و (b) زیاد

غیرمستقیم بررسی شد و نتایج خوبی حاصل گردید. ذرات پودر آلومینا با پوشش‌های پلی‌متیل متاکریلات و پلی‌استایرن و با درصد‌های وزنی 15,10,6,4,3,2 هرکدام به میزان 200 گرم تولید شدند و رفتار تفجوشی آن‌ها با درصد‌های وزنی مختلف بررسی شد. تجربه نشان از این دارد که با

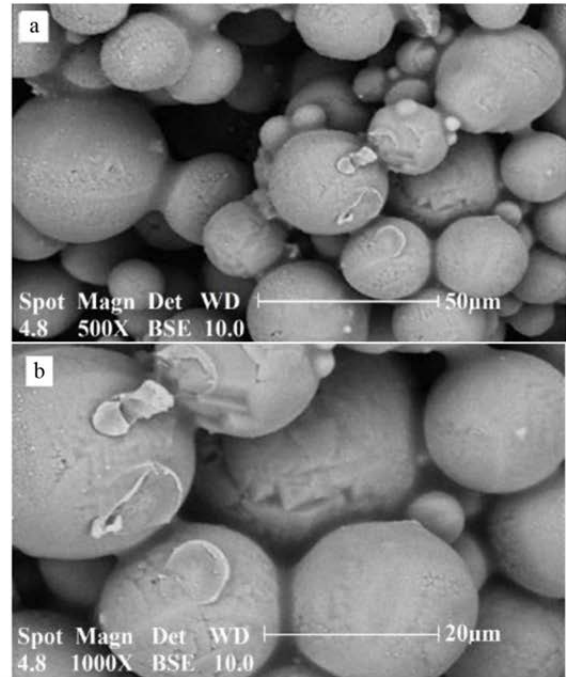


Fig. 13 SEM observations of the sintered sample (produced from 3 wt% PMMA/alumina powder particles) for top view at low (a) and high (b) magnification.

شکل 13 تصویر میکروسکوپی الکترون روبشی از سطح بالایی قطعات سبز ساخته شده از ذرات آلومینا با پوشش 3 درصد وزنی پلی‌متیل متاکریلات در بزرگنمایی (a) کم و (b) زیاد.

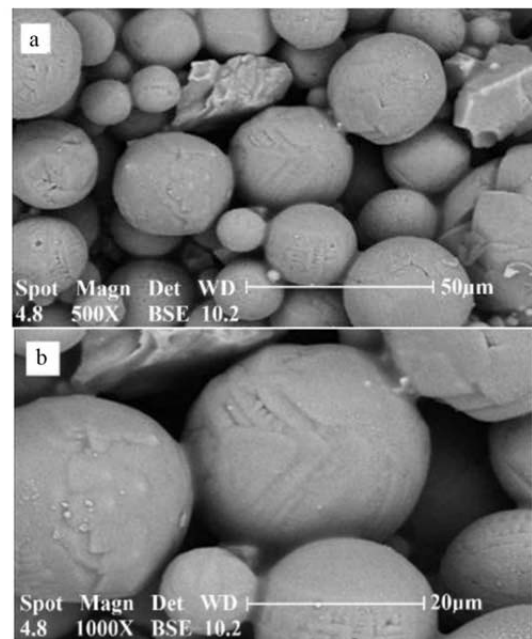


Fig. 14 SEM observations of the sintered sample (produced from 3 wt% PMMA/alumina powder particles) for side view at low (a) and high (b) magnification.

شکل 14 تصویر میکروسکوپی الکترون روبشی از سطح جانبی قطعات سبز ساخته شده از ذرات آلومینا با پوشش 3 درصد وزنی پلی‌متیل متاکریلات در بزرگنمایی (a) کم و (b) زیاد.

ترموپلاست آمورف بر روی ذرات آلومینای کروی به روش وارونگی فاز و همچنین امکان تولید قطعات آلومینا از طریق تفجوشی لیزری انتخابی

- selective laser sintering with a higher transmittance fiber laser, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 60, pp. 52–58, 2012.
- [8] K. Shahzad, J. Deckers, S. Boury, B. Neirinck, J. Kruth, J. Vleugels, Preparation and indirect selective laser sintering of alumina/PA microspheres, *Ceramics International*, Vol. 38, No. 2, pp. 1241–1247, 2012.
- [9] S. M. Nazemosadat, E. Foroozmehr, M. Badrossama, Preparation of alumina/polystyrene core-shell composite powder via phase inversion process for indirect selective laser sintering applications, *Ceramics International*, Vol. 44, pp. 596–604, 2018.
- [10] J. Deckers, K. Shahzad, L. Cardon, M. Rombouts, J. Vleugels, J. Kruth, Shaping ceramics through indirect selective laser sintering, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 22, No. 03, pp. 301–304, 2016.
- [11] J. Xing, W. Sun, R. S. Rana, 3D modeling and testing of transient temperature in selective laser sintering (SLS) process, *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, Vol. 124, No. 4, pp. 301–304, 2013.
- [12] J. Deckers, J. P. Kruth, L. Cardon, K. Shahzad, J. Vleugels, Densification and geometrical assessments of alumina parts produced through indirect selective laser sintering of alumina-polystyrene composite powder, *Strojnikski vestnik - Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 59, No. 11, pp. 646–661, 2013.
- [13] Z. Zeng, J. Yu, Z. X. Guo, Preparation of functionalized core-shell, *Macromolecular Chemistry and Physics*, Vol. 206, pp. 1558–1567, 2005.
- [14] K. Shahzad, J. Deckers, Z. Zhang, J. P. Kruth, J. Vleugels, Additive manufacturing of zirconia parts by indirect selective laser sintering, *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 34, No. 1, pp. 81–89, 2014.
- [15] L. Cardon, J. Deckers, A. Verberckmoes, K. Ragaert, L. Delva, K. Shahzad, J. Vleugels, J. P. Kruth, Polystyrene coated alumina powder via dispersion polymerization for indirect selective laser sintering applications, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 128, No. 3, pp. 2121–2128, 2012.
- [16] E. Duguet, M. Abboud, F. Morvan, P. Maheu, F. Michel, PMMA encapsulation of alumina through aqueous suspension polymerization processes, *Macromolecular Symposia*, Vol. 151, pp. 365–370, 2000.
- [17] S. Singh, S. Ramakrishna, R. Singh, Material issues in additive manufacturing: A review, *Journal of Manufacturing Processes* Vol. 25, pp. 185–200, 2017.
- [18] J. Bai, B. Zhang, J. Song, G. Bi, P. Wang, J. Wei, The effect of processing conditions on the mechanical properties of polyethylene produced by selective laser sintering, *Polymer Testing*, Vol. 52, pp. 89–93, 2016.
- [19] J. E. D. Dickens, B. L. Lee, G. A. Taylor, A. J. Magistro, H. Ng, K. P. McAlea, P. F. Forderhase, *Sinterable semi crystalline powder and near-fully dense article formed therewith*, US Patent RE39,354, 2006.
- [20] T. L. Richardson, E. Lokensgard, *Industrial Plastics: Theory and Applications*, Third Edition, pp. 1-180, New York: Delmar Cengage Learning, 1997.
- [21] Ph. Carson, C. Mumford, *Hazardous Chemicals Handbook*, Butterworth-Heinemann, Second edition, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002.
- [22] Z. H. Liu, J. J. Nolte, J. I. Packard, G. Hilmas, F. Dogan, M. C. Leu, Selective laser sintering of high density alumina ceramic parts, *Proceedings of the 35th International Matador Conference*, Taipei, Taiwan: Springer Verlag, London, pp. 351–354, 2007.
- [23] C. H. Jung, J. H. Choi, Y. M. Lim, J. P. Jeun, P. H. Kang, Y. C. Nho, Preparation and characterization of polypropylene nanocomposites containing polystyrene-grafted alumina nanoparticles, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 12, pp. 900–904, 2006.
- [24] D. L. Pavia, G. M. Lampman, G. S. Kriz, J. R. Vyvyan, *Introduction to Spectroscopy*, Fourth Edition, pp. 16–328, Belmont, CA: Brooks-Cole Thomson, 2009.
- [25] T. G. Fox, P. J. Flory, Second-order transition temperatures and related properties of polystyrene. I. Influence of molecular weight, *Journal of Applied Physics*, Vol. 21, No. 6, pp. 581–591, 1950.

افزایش درصد وزنی پوشش پلیمری بر روی آلومینا قطعات سبز مستحکم‌تری حاصل می‌شود اما این امر باعث اعوجاج و انقباض ابعادی بیشتر بعد از حذف ماده پلیمری در کوره و تولید قطعه قهوه‌ای اعوجاج یافته می‌گردد. آلومینا با پوشش 2 درصد وزنی ترموپلاست آمورف، پیوند خیلی ضعیف جهت اتصال ذرات آلومینا به روش تفجوشی لیزری انتخابی ایجاد می‌کند. لذا جهت تولید قطعات سرامیکی با ابعاد و هندسه دقیق‌تر کمترین درصد وزنی پوشش‌دهی ممکن، برابر 4 درصد وزنی برای پلی‌استایرن و 3 درصد وزنی برای پلی‌متیل متاکریلات انتخاب شد. همچنین در این تحقیق از میکروسکوپی الکترونی روبشی جهت مطالعه و بررسی مورفولوژی ذرات پوشش‌دار و ایجاد پوشش مناسب ذرات استفاده شده است. خصوصیات پیک‌های نشان داده شده در نمودار طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز نشان از ایجاد پیوند خوب در فصل مشترک پلیمرهای آمورف (پلی‌متیل متاکریلات و خصوصاً پلی‌استایرن) و آلومینا دارد. از تکنیک توزین حرارتی جهت مطالعه و بررسی مناسب بودن پوشش و میزان ضخامت پوشش بر روی ذرات آلومینا استفاده شده است و همچنین مطابقت مقدار اتلاف جرم با درصدهای وزنی در نظر گرفته شده در فرآیند پوشش‌دهی به روش وارونگی فاز می‌باشد. تکنیک گرماسنجی روبشی تفاضلی، مناسب بودن رفتار فرآوری و حرارتی پلیمر، دمای تبدیل شیشه‌ای پلیمر (پلی‌استایرن و پلی‌متیل متاکریلات) و همچنین تشکیل لایه پایدارتری از پلی‌استایرن یا پلی‌متیل متاکریلات (نسبت به مرحله پوشش‌دهی ذرات در حین فرآیند SLS) را نشان می‌دهد.

5- مراجع

- [1] M. Moradi, H. Abdollahi, Statistical modelling and optimization of the laser percussion microdrilling of thin sheet stainless steel, *Journal of lasers in Engineering*, Article in press, 2017.
- [2] M. Moradi, O. Mehrabi, T. Azdast, K. Y. Benyounis, Enhancement of low power CO2 laser cutting process for injection molded polycarbonate, *Optics & Laser Technology*, Vol. 96C, No. 10, pp. 208–218, 2017.
- [3] A. H. Faraji, M. Moradi, M. Goodarzi, P. Coluccid, C. Maletta, An investigation on capability of hybrid Nd:YAG laser-TIG welding technology for AA2198 Al-Li alloy, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 96, pp. 1-6, 2017.
- [4] I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies*, Second Edition, pp. 1-146, New York: Springer Science+Business Media, 2015.
- [5] J. P. Kruth, G. Levy, F. Klocke, T. H. C. Childs, Consolidation phenomena in laser and powder-bed based layered manufacturing, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 56, No. 2, pp. 730–759, 2007.
- [6] G. Wypych, *Handbook of Polymers*, Second Edition, pp. 449-554, Toronto: Chemical Technology Publishing, 2012.
- [7] F. R. Liu, J. J. Zhao, Q. Zhang, C. He, J. M. Chen, Processing and characterizations of 2%PF/silica sand core-shell composite powders by