

ساخت و بررسی ویژگی‌های نانوکامپوزیت Al_2O_3/Ag به روش ریخته‌گری ژلی (Gel-casting)

محسن حاجی*، مسعود علیزاده و تورج عبادزاده

پژوهشکده سرامیک، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۸۷/۱۲/۱۱، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۸۸/۰۴/۱۵، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۸۸/۰۵/۱۵

چکیده

در این تحقیق از مواد اولیه محلول در آب جهت ساخت نانوکامپوزیت آلومینا - نقره (۲ درصد وزنی) به روش ریخته‌گری ژلی استفاده گردید. نیترات نقره، به عنوان منبع ایجاد نانوذرات نقره در زمینه آلومینا به کار گرفته شد. نتایج حاصل از بررسی اثر پراکنده‌سازهای (Dispersants) مختلف بر روی رفتار رئولوژی سوسپانسیون‌ها نشان داد که پراکنده‌ساز دولاپیکس ET85 به مقدار ۱/۵ درصد وزنی مناسب می‌باشد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و آنالیز عنصری (EDX) حاکی از اثبات وجود نقره و توزیع بسیار یکنواخت نانوذرات نقره در زمینه آلومینا بوده و آنالیز میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) نشان داد که اندازه نانوذرات نقره سنتز شده حدوداً ۱۰ نانومتر می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: ریخته‌گری ژلی، آلومینا، نانوکامپوزیت، نانوذرات نقره، سوسپانسیون.

۱- مقدمه

می‌باشد. این روش برای اولین بار در دهه ۱۹۸۰ میلادی توسط Omatete و Janney در Oak Ridge National Laboratories در آمریکا ابداع شد [۲-۴]. در این روش، ابتدا یک سوسپانسیون حاوی پودر سرامیکی به همراه مونومرهای محلول در آب تهیه شده و سپس بعد از ریختن به درون قالب، با پلیمریزاسیون درجا (*in situ*)، پودر سرامیکی داخل شبکه ۳ بعدی پلیمری تثبیت می‌گردد. قطعه ژله‌ای تشکیل شده بعد از بیرون آمدن از قالب،

روش‌های کلوئیدی به واسطه ایجاد یک سوسپانسیون پایدار، باعث به وجود آمدن سیستم‌های کاملاً یکنواخت می‌شوند. امروزه سنتز نانوکامپوزیت‌ها از این روش‌ها کاربردهای وسیعی پیدا کرده است [۱]. یکی از روش‌های ساخت قطعات نانوکامپوزیتی که براساس سیستم‌های کلوئیدی بنا شده است روش ریخته‌گری ژلی

* عهده‌دار مکاتبات: محسن حاجی

نشانی: کرج، مشکین دشت، پژوهشگاه مواد و انرژی

تلفن: ۴-۰۲۶۱۳۱۳۱-۶۲۰۴۱۳۱۳۱-۶۲۰۴۱۳۱۳۱، دورنگار: ۰۲۶۱-۶۲۰۱۸۸۸-۶۲۰۴۱۳۱۳۱، پست الکترونیکی: m.haji83@gmail.com

موفقیت انجام شد. با استفاده از دستگاه رئومتر، خواص رئولوژی و همچنین به کمک میکروسکوپ‌های الکترونی روبشی و عبوری (SEM و TEM) ریزساختار و نحوه پخش نانوذرات در آن بررسی شد. از آنجاییکه این تحقیق اولین گزارش در زمینه ساخت نانوکامپوزیت‌ها به روش ریخته‌گری ژلی با استفاده از مواد اولیه محلول در آب می‌باشد، بنابراین می‌تواند گامی مهم در توسعه ساخت انواع نانوکامپوزیت‌هایی تلقی شود که نیاز به ایجاد یک سیستم کاملاً یکنواخت دارند.

۲- فعالیت‌های تجربی

۲-۱- مواد اولیه

در این تحقیق از آلومینای MR70 محصول شرکت Martinswerk با میانگین اندازه دانه $0.7 \mu\text{m}$ و نیترات نقره ($\text{Ag}(\text{NO}_3)$) محصول شرکت مرک (Merck) آلمان استفاده شد. همچنین از مونومرهای متا اکریل آمید (MAM) و متیلن بیس اکریل آمید (MBAM) برای ایجاد ژل و از آغازگر پرسولفات آمونیوم (APS) و کاتالیست تترا متیل اتیلن دی آمید (TMEDA) محصول کمپانی Sigma آمریکا، برای تسریع در فرآیند تشکیل ژل استفاده شد. عوامل پراکنده‌ساز با نام‌های تجاری دولاپیکس ET85، CE64، PC67، SPC7، CA، FF6 و FF7 از شرکت Zschimmer and Schwars آلمان تهیه شدند.

۲-۲- روش انجام کار

شکل ۱ فلوجارت انجام فرآیند ریخته‌گری ژلی را نشان می‌دهد. ابتدا مونومرها (MAM و MBAM) به همراه $1/5$ درصد وزنی عامل پراکنده‌ساز دولاپیکس ET85 در آب دیونیزه حل شدند. سپس نیترات نقره بر مبنای ۲ درصد وزنی نقره در قطعه نهایی، به سیستم فوق اضافه شد و نهایتاً پودر آلومینا بر مبنای ۵۰ درصد حجمی جامد به این محلول اضافه شد. سوسپانسیون حاصل به مدت ۲۴ ساعت بالمیل شد. در مرحله بعد، با افزودن آغازگر و کاتالیست، سوسپانسیون به درون قالب ریخته شده و به درون خشک‌کن با دمای 55°C منتقل گردید تا فرآیند تشکیل ژل انجام شود. بعد از ۱ ساعت قطعات از درون

خشک و نهایتاً با توجه به کاربرد آن، تا دمای مورد نظر سینتر می‌شود [۵۶]. از مزایای این روش نسبت به روش‌های سنتی مانند ریخته‌گری دوغابی و قالب‌گیری تزریقی (Injection molding) می‌توان به تشکیل سوسپانسیون با درصد جامد بالاتر، استفاده از مواد آلی کمتر، استحکام خام بالاتر، مواد قالب ارزان‌تر، در دسترس بودن مواد قالب و ساخت قطعات پیچیده و بزرگ اشاره کرد [۷]. تاکنون تحقیقات اندکی پیرامون ساخت نانوکامپوزیت‌ها به روش ریخته‌گری ژلی انجام شده است. به عنوان مثال در سال ۲۰۰۳، Niihara و همکارانش نانوکامپوزیت $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ni}$ را با استفاده از روش ریخته‌گری ژلی سنتز کردند.

در کار انجام شده ابتدا دانه‌های نانوکامپوزیتی $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{NiO}$ را سنتز کرده و سپس آنها را ریخته‌گری کردند. در ادامه قطعه ساخته شده را تا دمای 700°C حرارت داده و با عبور گاز H_2 از درون قطعه متخلخل و احیاء NiO به Ni ، نانوکامپوزیت فوق را تهیه کردند [۸].

در تحقیق دیگری Ananthakumar و همکارانش با استفاده از پراکنده کردن همزمان پودر آلومینا و نانوپودر SiC ، نانوکامپوزیت $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiC}$ را جهت بررسی ویژگی‌های خزشی آن تهیه کردند [۹].

در هیچکدام از تحقیقات انجام شده، از ماده اولیه محلول در آب برای سنتز فاز دوم نانوکامپوزیت استفاده نشده است. دلیل این امر با وجود یکنواختی بسیار بالایی که ایجاد می‌کند، احتمالاً اثر نامطلوب یون‌های فلزی بر روی عملکرد عامل پراکنده‌ساز و همچنین ویسکوزیته سوسپانسیون حاوی آنها می‌باشد [۱۰]؛ که برای رفع این مشکل، در این تحقیق از اثر کی‌لیت‌ها (Chelator) استفاده شد. در واقع با گیرانداختن یون‌های Ag^+ در داخل ساختار کی‌لیت، از اثرات نامطلوب آنها بر روی خواص رئولوژی سوسپانسیون جلوگیری شد.

نانوکامپوزیت $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ag}$ به عنوان کاتالیست در صنعت خودرو برای انجام واکنش احیاء NO_x به NO توسط هیدروکربن‌ها [۱۱] و در صنعت پتروشیمی برای یک سری واکنش‌ها کاربرد گسترده‌ای دارد [۱۲]. همچنین به دلیل وجود نقره می‌توان خواص ضد باکتری را نیز از آن انتظار داشت [۱۳]. در کار حاضر، سنتز نانوکامپوزیت (۲ درصد وزنی) $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ag}$ به روش ریخته‌گری ژلی با

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تعیین عامل پراکنده‌ساز مناسب

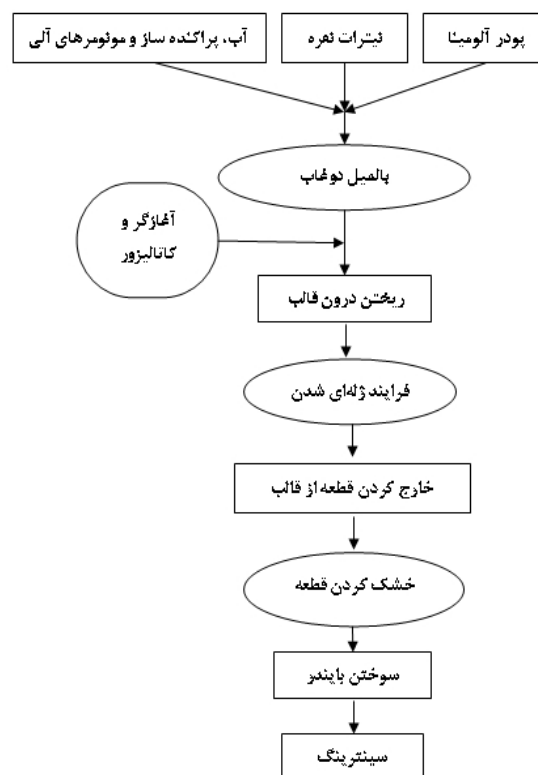
با انجام آزمایش‌های مختلف مشاهده شد که یون‌های نقره فلزی موجود در داخل سوسپانسیون با عوامل پراکنده‌ساز مختلف، کمپلکس‌هایی با رنگ‌ها و خواص متفاوتی ایجاد می‌کنند. همچنین نتایج نشان داد که یون‌های نقره با بعضی از انواع پراکنده‌ساز رسوب تشکیل می‌دهند. لذا عامل پراکنده‌ساز علاوه بر فاکتور قابلیت پخش ذرات آلومینا، بایستی به عنوان یک کی‌لیت (Chelator) نیز عمل کند. کی‌لیت‌ها مواد آلی هستند که با دارا بودن گروه‌های عاملی ویژه‌ای مانند گروه‌های کربوکسیلیک (COOH^-), سبب به دام انداختن ذرات و یون‌های فلزی در ساختارشان می‌گردند [۱۴]. به همین منظور، برای از بین بردن اثر نامطلوب یون‌های نقره بر روی خواص رئولوژیکی سوسپانسیون از پراکنده‌سازهای دارای گروه کربوکسیلیک استفاده شد (خانواده دولاپیکس). جدول ۱ نتایج حاصل از برهمکنش این عوامل پراکنده‌ساز با محلول نیترات نقره را نشان می‌دهد.

جدول ۱: نتیجه برهمکنش پراکنده‌سازهای مختلف در واکنش با محلول نیترات نقره.

پراکنده‌ساز	نتیجه حاصله در واکنش با نیترات نقره
CE64	تشکیل زل و انعقاد سوسپانسیون
ET85	محلول شفاف مایل به رنگ آبی
FF6	محلول بی‌رنگ
FF7	محلول بی‌رنگ
PC67	محلول زرد رنگ همراه با رسوب آهسته
SPC7	محلول زرد مایل به قهوه‌ای همراه با رسوب آهسته
CA	محلول بی‌رنگ

با توجه به جدول ۱، پراکنده‌سازهای دولاپیکس ET85، CA، FF6 و FF7 که در واکنش با محلول نیترات نقره کمپلکس‌های بی‌رنگ و بدون رسوب تشکیل داده بودند، برای تست رسوب انتخاب شدند. برای انجام تست رسوب، ۱ درصد وزنی از پراکنده‌سازهای فوق به سوسپانسیون ۱۰ درصد حجمی جامد آلومینا اضافه شدند. شکل ۲ نتایج حاصل از تست رسوب را برای پراکنده‌سازهای فوق نشان می‌دهد.

قالب‌ها خارج شده و وارد انکوباتور با ۹۵ درصد رطوبت و دمای 30°C شدند تا فرآیند خشک شدن با دقت کافی و بدون ترک خوردن قطعات انجام شود. در نهایت نمونه‌ها در دمای 1300°C توسط مایکروویو سینتر شدند. در واقع فرآیند سوختن بایندر و سینترینگ به صورت پیوسته و پشت سرهم انجام گرفت.



شکل ۱: فلوجرامت فرآیند ریخته‌گری زلی نانوکامپوزیت $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ag}$.

۳-۲- روش‌های آنالیز

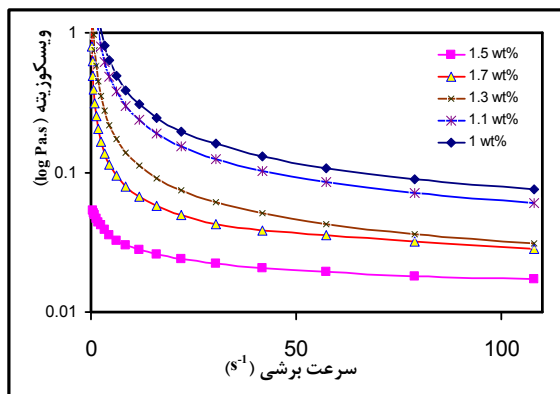
تست رسوب با استفاده از استوانه‌های مدرج به حجم cc ۱۰ انجام شد. خواص رئولوژیکی سوسپانسیون‌ها توسط رئومتر چرخشی مدل MCR300 انجام گرفت. آنالیز حرارتی همزمان (Simultaneous thermal analysis) نمونه‌ها با دستگاه PL1640 انجام شد. جهت بررسی ریز-ساختار و پخش نانوذرات از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM, Cambridge S360) و برای تعیین اندازه نانوذرات از میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM, EM208S, Philips) استفاده شد.

بعد از ۲۴ ساعت، به عنوان مقدار مناسب پراکنده‌ساز انتخاب شد.

مقدار مطلوب پراکنده‌ساز مورد استفاده در کار حاضر از مقادیر گزارش شده در تمامی مراجع مشابه (مانند آنچه که در مرجع [۱۵] گزارش شده است) بیشتر است. در واقع در اینجا به دلیل خاصیت کی‌لیت بودن این پراکنده‌ساز، بخشی از گروه‌های کربوکسیلیک که وظیفه پخش کردن ذرات آلومینا داخل سوسپانسیون را داشتند، اثرشان به واسطه به دام انداختن یون‌های نقره از بین رفته است. بنابراین از پراکنده‌ساز بیشتری برای رسیدن به خواص رئولوژی مطلوب استفاده شد.

۳-۳- بررسی رفتار رئولوژی سوسپانسیون

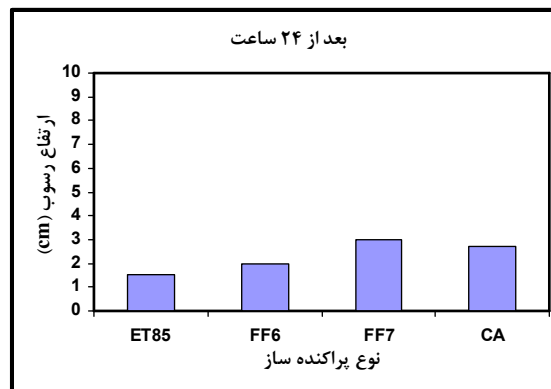
جریان‌یابی خوب و ویسکوزیته پایین سوسپانسیون با درصد حجمی بالا مهمترین فاکتور در رسیدن به یک قطعه سالم و با خواص مطلوب است. همچنین این امر در پر کردن تمام قسمت‌های قالب‌های پیچیده توسط سوسپانسیون، اهمیت زیادی پیدا می‌کند. شکل ۴، رفتار جریان‌یابی سوسپانسیون با ۵۰ درصد حجمی جامد آلومینا را در مقادیر مختلف پراکنده‌ساز ET85 نشان می‌دهد.



شکل ۴: رفتار جریان‌یابی سوسپانسیون در ۵۰ درصد حجمی جامد برای مقادیر مختلف پراکنده‌ساز دولاپیکس ET85.

شکل ۴ وابستگی شدید ویسکوزیته به مقادیر مختلف عامل پراکنده‌ساز را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود، سوسپانسیون در مقدار مطلوب پراکنده‌ساز دولاپیکس ET85 (۱/۵ درصد وزنی) کمترین ویسکوزیته را دارا می‌باشد و با تغییر در این مقدار، ویسکوزیته بیشتر می‌شود.

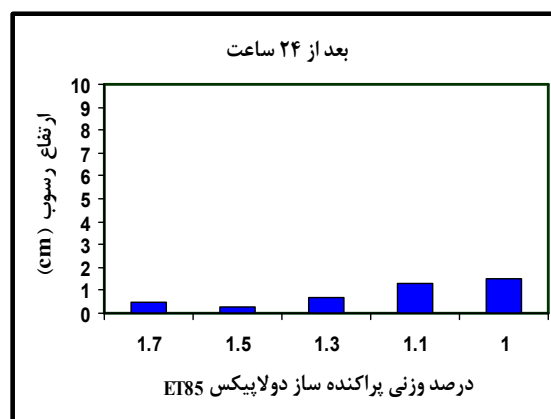
شکل ۲ نشان می‌دهد که سوسپانسیون حاوی پراکنده‌ساز دولاپیکس ET85 رسوب کمتری را بعد از ۲۴ ساعت نشان می‌دهد. بنابراین این پراکنده‌ساز به عنوان مناسب‌ترین عامل پراکنده‌ساز انتخاب شد و از آن برای انجام تست‌های بعدی استفاده گردید.



شکل ۲: تست رسوب پراکنده‌سازهای مختلف بعد از ۲۴ ساعت.

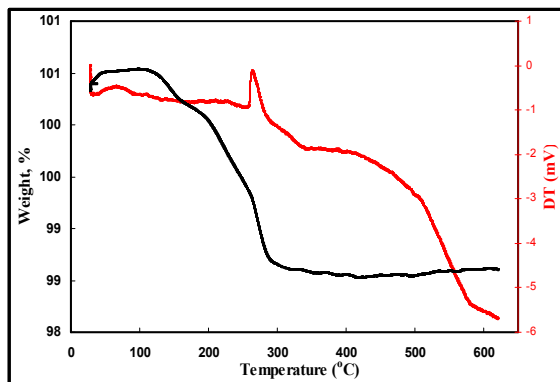
۳-۲- تعیین مقدار مطلوب پراکنده‌ساز

بعد از انتخاب نوع عامل پراکنده‌ساز مناسب، گام بعدی برای رسیدن به یک سوسپانسیون پایدار که قابلیت ریخته‌گری داشته باشد، به دست آوردن مقدار مطلوب پراکنده‌ساز می‌باشد. برای این کار یک سوسپانسیون حاوی ۱۰ درصد حجمی جامد با درصدهای مختلف عامل پراکنده‌ساز ET85 برای انجام تست رسوب تهیه شد. شکل ۳، نتایج حاصل از تست رسوب را بعد از ۲۴ ساعت نشان می‌دهد.



شکل ۳: رفتار رسوبی درصدهای مختلف پراکنده‌ساز ET85.

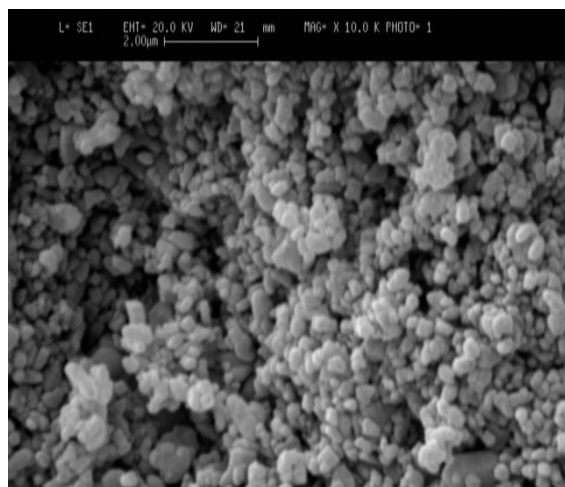
همانگونه که شکل ۳ نشان می‌دهد ۱/۵ درصد وزنی از دولاپیکس ET85 به دلیل داشتن کمترین میزان رسوب



شکل ۶: منحنی‌های آنالیز حرارتی (DTA-TG) نانوکامپوزیت $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ag}$.

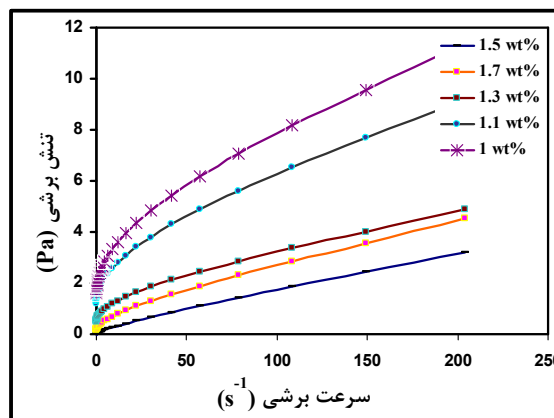
شکل ۸a، ریزساختار نانوکامپوزیت $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ag}$ سینتر شده در 1300°C توسط میکروویو را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود در این دما ذرات سینترپذیری خوبی را از خود نشان می‌دهند و تداخل بین دانه‌ها بسیار کم است. این امر منجر به ایجاد خواص مکانیکی مطلوبی می‌گردد.

شکل ۸b، تصویر Back scatter نانوکامپوزیت $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ag}$ می‌باشد. از آنجاییکه در تصویر Back scatter هر عنصری که جرمش بیشتر باشد روشن‌تر دیده می‌شود و با توجه به اینکه جرم اتمی نقره از آلومینیوم بیشتر است، لذا انتظار می‌رود نقاط سفید در شکل ۸b نانوذرات نقره در زمینه آلومینا باشند. شکل ۸c نیز نقشه نقطه‌ای (Map) نانوکامپوزیت می‌باشد و توزیع نانوذرات نقره در زمینه آلومینا را نشان می‌دهد.



شکل ۷: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی بدنه خام نانوکامپوزیت $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ag}$.

همچنین شکل ۵ نشان می‌دهد که سوسپانسیون در تمامی مقادیر پراکنده‌ساز، دارای رفتار شبه پلاستیک است؛ که یک رفتار مناسب برای ریخته‌گری ژلی می‌باشد.



شکل ۵: تنش برشی بر حسب سرعت برشی در ۵۰ درصد حجمی جامد برای مقادیر مختلف پراکنده‌ساز دولاپیکس ET85.

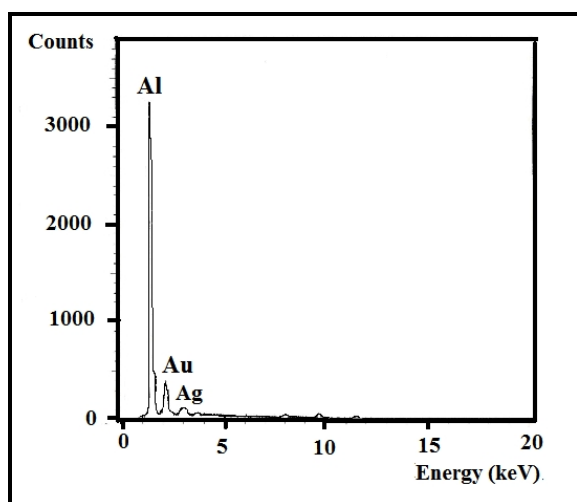
۳-۴- آنالیز حرارتی

آنالیز حرارتی همزمان (DTA-TG) در شکل ۶ نشان داده شده است. سرعت گرمایش $5^\circ\text{C}/\text{min}$ در نظر گرفته شد. تا زیر دمای حدود 300°C یک افت وزنی پیوسته (در نمودار TG) و یک پیک گرمازا (در نمودار DTA) مشاهده می‌شود. وجود این پیک گرمازا به خاطر خارج شدن پلیمرها (MAM, MBAM) می‌باشد که تطابق خوبی با کارهای انجام گرفته در این زمینه دارد [۸]. در ادامه، حدود دمای 350°C یک پیک پهن گرماگیر مشاهده می‌شود که می‌تواند به دلیل خروج نیترات باشد. اما به دلیل اینکه مقدار آن بسیار کم است لذا تغییر محسوسی در نمودار TG مشاهده نمی‌شود.

۳-۵- نتایج میکروسکوپ الکترونی روبشی

شکل‌های ۷ و ۸، نتایج حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی را نشان می‌دهند. شکل ۷، ریزساختار نمونه خام نانوکامپوزیت $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ag}$ را نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌شود، بدنه دارای یک ساختار یکنواخت از نظر توزیع ذرات آلومینا می‌باشد؛ که این ساختار منجر به ایجاد خواص مکانیکی مطلوبی می‌گردد.

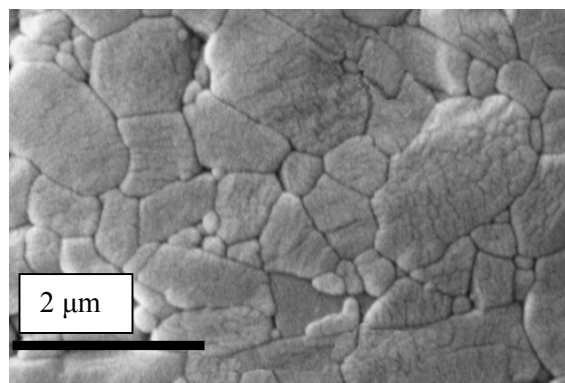
از نیترات نقره (محلول در آب) و ایجاد یون‌های نقره در سوسپانسیون می‌باشد؛ که این یون‌ها در اثر حرارت دادن به صورت نانوذرات به سطح ذرات آلومینا چسبیده‌اند. آنالیز عنصری (EDX) گرفته شده از نانوکامپوزیت نیز وجود عنصر نقره را در زمینه آلومینا تایید می‌کند (شکل ۹). پیک طلای موجود در نمودار به خاطر وجود پوشش طلا روی نمونه به منظور انجام آنالیز SEM می‌باشد. در اینجا به دلیل اینکه آنالیز EDX تنها بخش بسیار کوچکی از نمونه را در برمی‌گیرد، لذا برای اندازه‌گیری نسبت وزنی فلز نقره موجود در نانوکامپوزیت، نمی‌توان به طور دقیق نسبت شدت پیک Al به Ag را ملاک محاسبه قرار داد. ولی با این وجود با توجه به شکل ۹، مقدار این نسبت حدود ۲ می‌باشد؛ که معادل همان مقدار اولیه در نظر گرفته در سیستم می‌باشد.



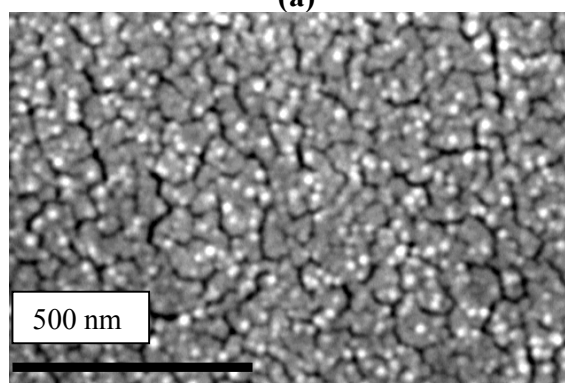
شکل ۹: آنالیز EDX نانوکامپوزیت Al_2O_3/Ag .

۳-۶- نتایج میکروسکوپ الکترونی عبوری

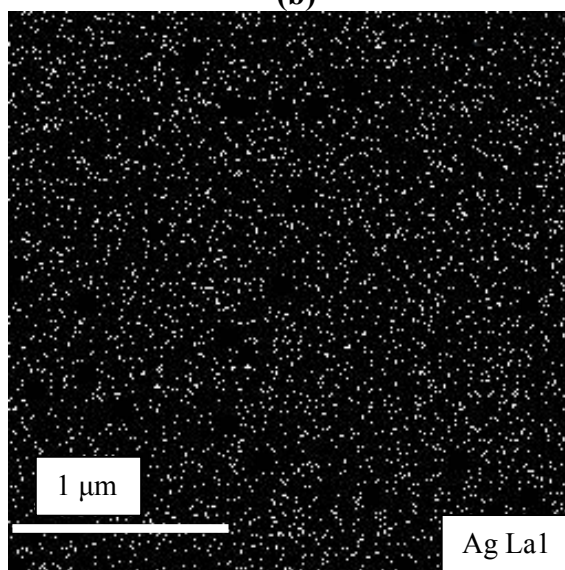
شکل ۱۰ تصاویر الگوی پراش الکترونی (SAED) به دست آمده از نقره خالص (۱۰a)، آلومینای خالص (۱۰b) و نانوکامپوزیت Al_2O_3/Ag (۱۰c) را نشان می‌دهد. برای مواد تک کریستال این الگو به صورت نقطه‌ای و برای مواد پلی کریستال به صورت حلقه‌ای می‌باشد [۱۶]؛ اما با این حال هیچ‌گاه یک شکل ایده‌آل به دست نمی‌آید. با توجه به کارهای قبلی انجام گرفته، تصاویر بدست آمده از الگوی پراش الکترونی با الگوهای ساختارهای آلفا آلومینا (hcp) [۱۷] و نقره (fcc) [۱۸] تطابق دارد.



(a)



(b)

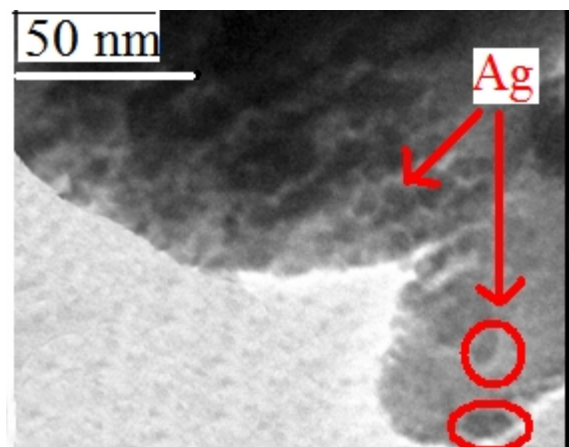


(c)

شکل ۸: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نانوکامپوزیت Al_2O_3/Ag سینتر شده در $1300^\circ C$ درون مایکروویو، (a) تصویر ریزساختار زمینه، (b) تصویر نانوذرات نقره بخش شده در زمینه آلومینا و (c) تصویر توزیع نانوذرات (Map).

با توجه به شکل‌های ۸b و ۸c می‌توان گفت که نانوذرات نقره توزیع بسیار مناسبی را در زمینه آلومینا داشته‌اند. این یکنواختی بسیار خوب در توزیع نانوذرات به خاطر استفاده

همچنین شکل ۸b، اندازه نانوذرات حدوداً زیر ۱۰ نانومتر می‌باشد.



شکل ۱۱: تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری نانوکامپوزیت $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ag}$.

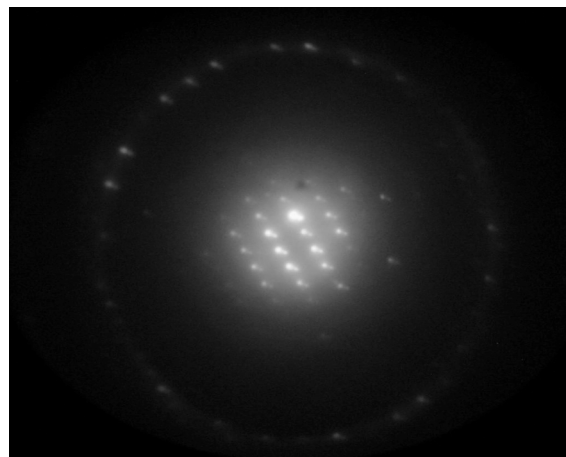
۴- نتیجه‌گیری

سنتز نانوکامپوزیت $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ag}$ (۲ درصد وزنی) به روش ریخته‌گری ژلی برای اولین بار با استفاده از مواد اولیه محلول در آب (نیترات نقره) برای ایجاد نانوذرات نقره به عنوان فاز دوم، با موفقیت انجام شد.

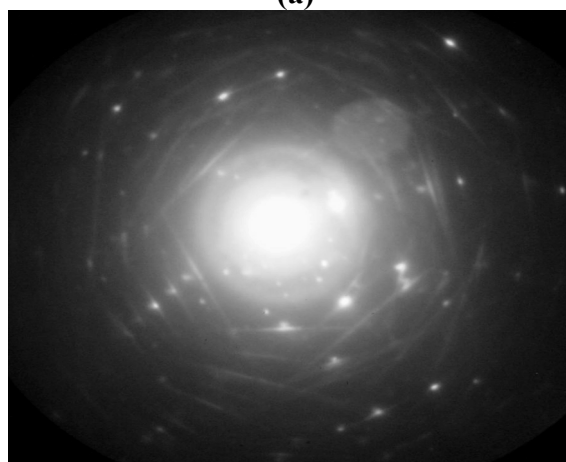
پراکنده‌ساز دولاپیکس ET85 به دلیل دارا بودن خواص کی‌لیتی برای به دام انداختن یون‌های نقره و همچنین قدرت پراکنده‌سازی بالا، به عنوان عامل پراکنده‌ساز مناسب انتخاب شد. همچنین سوسپانسیون‌ها در مقدار مناسب ۱/۵ درصد وزنی از عامل پراکنده‌ساز دولاپیکس ET85 خواص جریان‌یابی خوب و رفتار شبه‌پلاستیک را از خود نشان دادند.

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و آنالیز عنصری گرفته شده از نانوکامپوزیت $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ag}$ حضور نانوذرات نقره و پخش بسیار یکنواخت آنها در زمینه آلومینا را نشان دادند. همچنین تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری حاکی از وجود نانوذرات نقره سنتز شده با اندازه حدوداً زیر ۱۰ نانومتر بود.

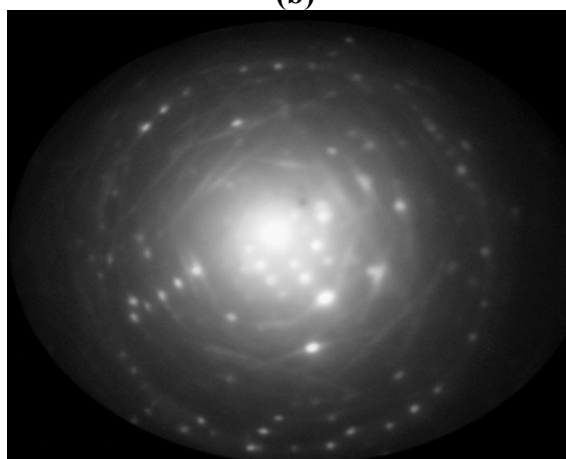
تصاویر الگوی پراش الکترونی (SAED) نیز وجود ذرات نقره در زمینه آلومینا و ساختار کریستالوگرافی آنها را تایید کردند.



(a)



(b)



(c)

شکل ۱۰: الگوی پراش الکترونی (SAED)، (a) نانوذرات نقره، (b) آلومینای خالص، (c) نانوکامپوزیت $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ag}$.

تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری گرفته شده از نانوکامپوزیت $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ag}$ در شکل ۱۱ نشان داده شده است. با توجه به تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری و

مراجع

- [9] S. Ananthakumar, K. Prabhakaran, U.S. Hareesh, P. Manoharb, K.G.K. Warriar, *Materials Chemistry and Physics*, **85**, 2004, 151.
- [10] L. Zhao, J.L. Yang, L.G. Ma, Y. Huang, *Materials Letters*, **56**, 2002, 990.
- [11] W. Yao, G. Lu, Y. Guo, Wang, Z. Zhang, *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, **276**, 2007, 162.
- [12] Y.C. Kima, N.C. Park, J.S. Shin, S.R. Lee, Y.J. Lee, D.J. Moon, *Catalysis Today*, **87**, 2003, 153.
- [13] M. Machida, K. Norimoto, T. Kimura, *Journal of the American Ceramic Society*, **88**, 2005, 95.
- [14] J. Ma, Z. Xie, H. Miao, B. Zhang, X. Lin, Y. Cheng, *Materials and Design*, **26**, 2005, 291.
- [15] J. Tong, D. Chen, *Ceramics International*, **30**, 2004, 2061.
- [16] X. Shen, L.J. Garces, Y. Ding, K. Laubernds, R.P. Zenger, M. Aindowa, E.J. Neth, S.L. Suib, *Applied Catalysis A: General*, **335**, 2008, 187.
- [17] M.M. Martin-Ruiz, L.A. Perez-Maqueda, T. Cordero, V. Balek, J. Subr, N. Murafa, J. Pascual-Cosp, *Ceramics International*, **35**, 2009, 2111.
- [18] G. Safran, O. Geszti, G. Radnoczi, *Vacuum*, **71**, 2003, 299.
- [1] L.G. Ma, Y. Huang, J.L. Yang, H.R. Le, Y. Sun, *Ceramics International*, **32**, 2006, 93.
- [2] F.S. Ortega, R.H.R. Castro, D. Gouvêa, V.C. Pandolfelli, *Ceramics International*, **34**, 2008, 237.
- [3] A.C. Young, O.O. Omatete, M.A. Janney, P.A. Menchhofer, *Journal of the American Ceramic Society*, **74**, 1991, 612.
- [4] L.S. Gyger Jr, P. Kulkarni, H.A. Bruck, S.K. Gupta, O.C. Wilson Jr, *Materials Science and Engineering*, **27**, 2007, 646.
- [5] Fa-Zhi Zhang, T. Kato, M. Fuji, M. Takahashi, *Journal of the European Ceramic Society*, **26**, 2006, 667.
- [6] A.A. Babaluo, M. Kokabi, M. Manteghian, R. Sarraf-Mamoory, *Journal of the European Ceramic Society*, **24**, 2004, 3779.
- [7] M.A. Janney, O.O. Omatete, C.A. Walls, S.D. Nunn, R.J. Ogle, G. Westmoreland, *Journal of the American Ceramic Society*, **81**, 1998, 581.
- [8] K. Niihara, B.S Kim, T. Nakayama, T. Kusunose, T. Nomoto, A. Hikasa, T. Sekino, *Journal of the European Ceramic Society*, **24**, 2004, 3419.