بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت هایدAl-Al₂O3تولید شده به روش پلاسمای جرقه ای(SPS)

داود خادمی^۱*، ابوالفضل باباخانی^۲

چکیدہ

در پژوهش حاضر، کامپوزیت Al₂O₃ - Al₂O به روش SPS که یکی از روشهای نوین تف جوشی پودرهای فلزی است، تولید شد. ریز ساختار نمونههای تولید شده با استفاده از میکروسکوپ نوری بررسی شد و تشخیص عناصر و ترکیبات حاضر در ساختار کامپوزیت با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مجهز به سیستم EDS صورت گرفت. همچنین به منظور بررسی اثر مقادیر Al₂O₃، آزمونهای استحکام فشاری، سختی و بررسی دانسیته نسبی بر روی نمونههای حاوی (۱۵–۰) درصد وزنی Al₂O₃ انجام شد. نتایج مشان میدهد که با افزایش درصد Al₂O₃ سختی برینل نمونهها تا حدود۹۵٪ افزایش یافته است. در نمونه با ۵ درصد وزنی Al₂O₃ در مینه ا استحکام نسبت به نمونه آلومینیوم خالص حدود ۴۰ درصد افزایش پیدا کرده است و توزیع یکنواخت ذرات Al₂O₃ در زمینه Al مشاهده میشود؛ اما با افزایش درصد وزنی ذرات Al₂O₃ در مونههای حاوی ۱۹ درصد، کاهش است. در نمونه با ۵ درصد وزنی Al₂O₃ در مینه I مشاهده میشود؛ اما با افزایش درصد وزنی ذرات Al₂O₃ در مدونههای حاوی ۱۹ درصد، کاهش است. در نمونه با ۵ درصد وزنی Al₂O₃ در مینه I مشاهده میشود؛ اما با افزایش درصد وزنی ذرات Al₂O₃ در مدونههای حاوی ۱۹۵۰ در مده کاهش است. در نمونه با ۵ درصد وزنی Ih

واژههای کلیدی: کامپوزیتهای زمینه آلومینیومی، Al₂O₃، پلاسمای جرقهای، استحکام فشاری.

۱- کارشناس ارشد مهندسی مواد، آزمایشگاه مرکزی دانشگاه فردوسی مشهد

۲- دانشیار، گروه مواد و متالورژی، دانشگاه فردوسی مشهد

dav.khademi@gmail.com:- نویسنده مسئول مقاله

پیشگفتار

استحکام، مدول یانگ و سایر خواص مکانیکی آلومینیوم نسبت به فلزاتی چون آهن، نیکل و تیتانیم ضعیفتر میباشد. لذا از آلومینیوم صرفاً به صورت آلیاژی یا زمینه کامیوزیت یا ترکیبی از این دو استفاده می شود تا از خواص مکانیکی بهتری در کنار دانسیته کمتر و انعطاف پذیری مطلوب برخوردار باشد. بر همین اساس کامپوزیتهای زمینه آلومینیومی طی دو دهه گذشته بسیار مورد توجه قرار گرفتهاند[۲٫۱]. آلومینیوم یکی از عمومی ترین زمینه ها برای کامپوزیت های زمینه فلزی با چگالی کم و با قابلیت رسوب سختی، مقاومت خوردگی خوب و هدایت حرارتی بالا میباشد و از مزیتهای مهم آن، در دسترس بودن و فراوانی آن است[۳–۵]. از ذرات سرامیکی مقاوم در برابر حرارت مثلAl2O3,TiB2,SiC یا TiC، جهت مقاوم کردن آلومينيوم و توليد كامپوزيت زمينه آلومينيوم استفاده مي شود. چنین تقویت کنندههایی امکان کنترل ریزساختار، خواص مکانیکی و سطحی کامپوزیت را از طریق کنترل حجمی، اندازه و توزيع اجزاء فراهم مي كنند. در اين ميان Al₂O₃ بسيار مورد توجه است؛ زیرا با زمینه در دماهای بالا واکنش نمی دهد و هم چنین فاز نامطلوب ایجاد نمی کند [۶]. روش های زیادی برای توليد كامپوزيتهاى زمينه آلومينيوم مورد مطالعه قرار گرفته است. در روشهای حالت مایع، ذرات سرامیکی با هم زدن به آلومینیوم مذاب، قبل از ریخته گری اضافه می شوند. که در این روش، تفاوت میان چگالی آلومینیوم و ذره سرامیکی مانع از توزيع يكنواخت اين ذرات در زمينه آلومينيومي مي شود و از طرف دیگر تر شوندگی ضعیف ذرات سرامیکی، سبب ایجاد فصل مشترک ضعیف بین فاز تقویت کننده و زمینه می شود که بر روی خواص مکانیکی نمونههای تولید شده تاثیر به سزایی دارد[۷] . با استفاده از روشهای حالت جامد تا حدودی می توان بر این مشکلات غلبه کرد. روش های حالت جامد که بر پایه متالورژی پودر استوار هستند در مقایسه با روشهای مذاب، دمای کاری پایین تری دارد و به همین دلیل از تولید فازهای ناخواسته میان فاز زمینه و تقویت کننده جلوگیری مى شود. افزون بر اين، مى توان به توزيع يكنواخ تر ذرات تقويت کننده در زمینه، و هزینه تولید پایینتر دست یافت[۸] .

از جمله روشهایی که به سرعت جهت تولید محدوده وسیعی از مواد پیشرفته مثل نانوکریستالها ، نانوکامپوزیتها وغیره توسعه یافته است روش SPS است[۹و۱۰]. در این روش، پودر به داخل قالبی استوانهای شکل از جنس گرافیت و یا مواد عایق ریخته شده و دو پانچ از بالا و پایین آن را فشرده SID.ir

می سازند. اعمال جریان الکتریکی به توده پودر، نیروی محرکه لازم برای تف جوشی را فراهم کرده و سبب می شود، فرایند تولید در زمانی اندک به اتمام رسد[۱۱]. شکل(۱) شماتیک فرایند تف جوشی به کمک جریان الکتریکی را نشان می دهد. در این شکل مشاهده می شود که پانچها افزون بر اعمال پالسهای الکتریکی، فشاری را به طور ثابت و یا متغییر بر توده پودر اعمال می کند که این موجب تف جوشی و همگیر شدن پودر با چگالی و خواص مورد نظر می گردد.



- 1 Termocouple
- 2 Punch & Die 3 Vacuum Chamber

شکل (– شماتیک دستگاه SPS [۱۱]

مخلوط پودری که در این فرایند مورد استفاده قرار می گیرد، از نظر الکتریکی می تواند رسانا و یا عایق الکتریکی باشد. در رابطه با پودرهای رسانا، قالب می تواند رسانا و یا عایق باشد در حالی که برای پودرهای عایق باید از قالبی رسانا استفاده نمود. این مسئله از این جهت دارای اهمیت است که برای ایجاد گرمای ژول و انجام تف جوشی همواره باید مدار الکتریکی بسته باشد [۹]. ویژگی مهم این روش، تف جوشی فلزات و سرامیکها به ویژه مواد دیرگداز تا نزدیک چگالی تئوری در زمانی اندک می باشد [۲]. وجه تمایز این روش با الکتریکی از درون توده پودر و محفظه نگهدارنده آن برای تولید حرارت می باشد. تف جوشی به این روش شامل دو مکانیزم عمده است. نخست، اعمال جریان الکتریکی از درون توده پودر رسانا، سبب ایجاد جرقه در بین ذرات شده که یک منطقه

مجله مواد نوین / جلد ۷/شماره ۲/ زمستان ۱۳۹۵

موضعی با درجه حرارت خیلی بالا ایجاد میکند، دوم بر طبق قانون ژول، عبور جریان الکتریکی از مواد رسانا در اثر مقاومت الكتريكي توليد حرارت ميكند[١٣]. همين موضوع اساس و شالوده روش تف جوشى به كمك جريان الكتريكي مى باشد. این روش به دلیل برتریهای تکنیکی و اقتصادی که نسبت به روشهای معمول تف جوشی دارا می باشد، جذابیت خاصی برای محققین پیدا کرده است. از جمله این ویژگیها می توان به نرخ گرمایش سریعتر، دمای تف جوشی پایینتر، زمان کمتر نگهداری در دما، تف جوشی موادی که به سختی تف جوشی می گردند، عدم نیاز به مواد کمکی برای تف جوشی، عدم نیاز به فشرده کردن پودر پیش از تف جوشی، حساسیت کمتر به ویژگیهای اولیه پودر و بهبود خواص مواد تف جوشی شده اشاره کرد[۱۵و۱۴] . در پژوهش حاضر، کامپوزیت Al- Al₂O₃ به روش SPS تولید شده است.

مواد و روشها

مواد اولیه استفاده شده در این پژوهش، شامل پودر است Al₂O₃ آلومینیوم که از شرکت مرک تهیه شده و پودر که مشخصات آنها در جدول (۱) آورده شده است.

جدول۱- مواد مورد استفاده در یژوهش

خلوص.٪	متوسط اندازه ذرات	مواد
٩٩	۴۵µm	پودر آلومينيوم
٩٩	۵µm	پودر Al ₂ O ₃

به منظور تولید کامپوزیت Al- Al₂O₃ با درصدهای وزنی مختلف Al₂O₃) Al₂O₃) باید ذرات Al₂O₃) به صورت یکنواخت در بین ذرات پودر آلومینیوم پخش شوند که به این منظور از فرایند آسیاکاری گلولهای ماهوارهای استفاده شد. آسیاکاری پودر آلومینیوم به همراه تقویت کنندهاش (Al₂O₃) در محیط گاز آرگون به مدت زمان یک ساعت با سرعت چرخش ۲۰۰ دور بر دقیقه و با نسبت وزنی گلوله به پودر (۱۰:۱) انجام شد. همچنین در طی آسیاکاری به منظور جلوگیری ازذوب یا به هم چسبیدن پودرها یا چسبیدن ذرات

پودر آلومینیوم به گلولهها یا دیواره ظرف، از متانول به عنوان عامل کنترل کننده (PCA^۳) استفاده شد.

سپس پودرهای مخلوط شده Al-Al₂O₃ را درون قالب استوانهای شکلی از جنس گرافیت با قطر داخلی۶ mm ریخته شد تا تف جوشی پودر ذکر شده با استفاده از دستگاه SPS در محيط خلاء(Torr) با اعمال جريان الكتريكي مستقيم پالسی با دانسیته ۷۸/mm² به مدت زمان ۴۵۰ ثانیه در دمای[°] ۵۶۰ انجام شد. این در حالی است که به طور همزمان فشار تک محوری ۳۲Mpa به نمونه پودری در حین تف جوشی اعمال شد. یکی از مهمترین ویژگیهای استفاده از روش SPS، سرعت گرمایش بسیار بالای این روش نسبت به روشهای مشابه تف جوشی و همچنین دمای کمتر تف جوشی کردن پودر مورد نظر است[۱۶]. در پژوهش حاضر، بررسی تغییرات دما در حین تف جوشی پودر Al-Al₂O₃ با استفاده از ترموکوپل نوع K اندازه گیری شد. برای این منظور در جداره بیرونی قالب گرافیتی حفرهای به قطر mm ایجاد شد تا ترموکویل درون این حفره قرار گیرد و در تماس با قالب گرافیتی باشد. تغییرات دمای نمونه با گذشت زمان به وسیله یک سیستم داده گیر Advantech 4718 با قابلیت ثبت حداقل ۱۰ داده در ثانيه ثبت گرديد. جهت محاسبه سرعت گرمايش (متوسط)، دمایی که تف جوشی در آن انجام شده، بر کل زمان تف جوشی تقسیم شد. پس از تف جوشی شدن پودرهای مورد نظر در دمای $^{\circ}\mathrm{C}$ ، جریان الکتریکی قطع شده و نمونه به صورت طبیعی در محیط ذکر شده، سرد شد. در نهایت نمونههای استوانهای شکل با قطر ۶mm و طول ۱۰ mm تولید شدند. به منظور بررسی تاثیر مقدار Al₂O₃ بر روی خواص مکانیکی، آزمون فشار تک محوری در دمای اتاق با نرخ کرنش¹⁻۰/۰۳s بر روی نمونههای استوانهای شکل انجام گرفت. طبق استاندارد(ASTM E9)، نسبت ارتفاع به قطر نمونهها ۱/۵ بود. در این کار تحقیقاتی چگالی نمونهها با وزن سنجی به وسیله یک ترازوی حساس الکتریکی و محاسبه حجم نمونهها به روش هندسی محاسبه شد(محاسبه حجم استوانه با قطر و طول مشخص) و با مقدار چگالی تئوری مقایسه شد. جهت بررسی سختی، سختی سنجی برینل با اعمال بار ۵ کیلوگرم بر روی سطح يوليش شده نمونهها انجام شد.

بحث و نتايج

شکل(۲)، تغییرات دما و سرعت گرمایش بر حسب زمان در حین تف جوشی پودر آلومینیوم به وسیله SPS را نشان میدهد. همان گونه که مشاهده می شود به محض اعمال جریان الكتريكي، دما به شدت افزايش مي يابد. ابتدا به دليل ايجاد جرقه در فضای بین ذرات پودر آلومینیوم، سرعت گرمایش(شیب نمودار دما- زمان) بسیار زیاد است و به حدود١٥°C/Secمىرسد. هنگامى كه اين تخليه الكتريكى و ایجاد جرقه در فضای بین دو ذره صورت می گیرد، یک منطقه موضعی با درجه حرارت بسیار بالا به صورت لحظهای تشکیل می شود. این موضوع، سبب ذوب و یا تبخیر بر روی سطح ذرات و در نتیجه تشکیل گلویی می گردد [۱۴] . پس از آن جریان الکتریکی مستقیم پالسی از ذرهای به ذرهی دیگر، از طریق گلویی اتصال دهندهی آنها جریان می یابد. در این مرحله گرمایش ژولی به واسطه مقاوت الکتریکی پودر ذکر شده، باعث افزایش دما میشود که سرعت گرمایش نسبت به حالت قبل(ایجاد جرقه) کمتر شده و به صورت کاهش شیب در نمودار مشاهده میشود.



شکل۲- نمودار تغییرات دما و سرعت گرمایش بر حسب زمان در حین تف جوشی پودر آلومینیوم به وسیله SPS

شکل(۳)، تصاویر میکروسکوپ نوری مربوط به نمونههای آلومینیوم خالص پس از تف جوشی را نشان میدهد. همان گونه که مشاهده میشود، ذرات پودر آلومینیوم پس از یک ساعت آسیاکاری در محیط گاز آرگون، کشیده شده و ساختار لایهای موازی تشکیل دادهاند. که دلیل آن میتواند، آسیاکاری در اتمسفر آرگون باشد؛ زیرا در غیر این صورت در اثر حضور اکسیژن در اتمسفر و ایجاد لایههای اکسید سطحی بر ذرات پودر، کارایی فرایند آسیاکاری کاهش مییابد. ذرات پودر آلومینیوم اکسید شده، ترد و شکننده هستند و طی آسیاکاری میشکنند و خرد میشوند؛ اما با حضور گاز آرگون ذرات نرم آلومینیوم کشیده شده و مورفولوژی پولکی ایجاد کردهاند[۱۷].



شکل۳- تصاویر میکروسکوپ نوری از نمونه های آلومینیوم خالص

www.SID.ir

همان گونه که در تصاویر شکل (۳) مشاهده می شود، تف جوشی پودر آلومینیوم در دمای ۲۰۵۶ به خوبی صورت گرفته و ذرات پودر به خوبی با هم اتصال پیدا کردهاند. هم چنین اعمال همزمان فشار تک محوری به نمونهها در حین تف جوشی، باعث اتصال بهتر ذرات به یکدیگر شده و تف جوشی در دمای کم تری نسبت به دیگر روش های معمول انجام می شود.

شکل(۴) تصاویر SEM تهیه شده از نمونه حاوی ۵ درصد وزنی Al₂O₃ را به همراه آنالیز EDS آن نشان می دهد. همان گونه که در تصاویر دیده می شود، در نمونه با ۵ درصد وزنی Al₂O₃ توزیع تقریباً یکنواخت ذرات Al₂O₃ در زمینه آلومینیومی وجود دارد و همچنین تخلخل یا حفره در این نمونه مشاهده نمی شود؛ اما با افزایش درصد وزنی AO₂O₃ در نمونههای حاوی ۵ دو ۱۰ درصد، تخلخلهایی دراین نمونهها مشاهده می شود که دلیل آن حضور ذرات سخت Al₂O₃ است که مانند یک شبکه سخت مانع از فشرده شدن کامل پودر در این نمونهها شده و در نتیجه میزان تخلخل افزایش می یابد.

متخلخل شدن زمینه آلومینیومی را در این نمونه نشان میدهد، در شکل (۵) آورده شده است.



شکل۴- تصویر SEM از نمونه با ۵ درصد وزنیدAl₂O₃، به همراه آنالیز EDS از نقاط مختلف

www.SID.ir



شکل۵ - تصویر SEMتهیه شده از نمونه حاوی ۱۰ درصد وزنیدAl₂O3

اثر ذرات آلومینا روی چگالی نسبی

همان گونه که در شکل۶ مشاهده میشود، چگالی نسبی(چگالی تجربی نسبت به چگالی تئوری) با افزایش میزان ذرات تقویت کننده کاهش مییابد که دلیل آن، در مقایسه با آلومینیوم خالص، کاهش در قابلیت تراکم پذیری نمونه با افزایش آلومینا میباشد؛ زیرا این ذرات سختی بسیار بالایی دارند که تراکم پذیری و متعاقباً چگالی را کاهش میدهند. دلیل دیگری که میتوان برای این موضوع بیان کرد، اثر جلوگیری کننده ذرات آلومینا روی مکانیزم تف جوشی است. دمای ذوب بالای آلومینا سبب میشود، تمایل کمی برای تشکیل پیوند با آلومینیوم خالص داشته باشد که در نتیجه باعث تشکیل شبکههای ضعیف میشود. از سوی دیگر نیز با

مییابد[۱۸].



شکل ۶- اثر میزان ذرات آلومینا روی چگالی نسبی

اثر ذرات آلومينا روى استحكام فشاري

وجود حفره و تخلخل، تاثیر به سزایی بر روی خواص مکانیکی این نمونهها دارد[۱۹]. پس از انجام آزمون فشار، استحکام فشاری نهایی نمونههای مختلف بر حسب میزان ذرات تقویت کننده در نمودار شکل (۷) آورده شده است.







اثر ذرات آلومينا روي سختي

همان گونه که در شکل ۹ مشاهده می شود، با افزایش مقدار آلومینا سختی کامپوزیت افزایش مییابد و سختی آن بسیار بالاتر از آلومینیوم خالص است. این حقیقت را می توان به آسانی با رابطه زیر نشان داد:

$H_c = H_m f_m + H_r f_r$

Hr،Hm وH به ترتیب سختی زمینه، تقویت کننده و کامپوزیت است و Hr،Hm می اشد. است و fm و fm می کسر تقویت کننده و زمینه می اشد.

البته دادههای بدست آمده از این رابطه زمانی درست است که پارامترهایی مثل دانسیته نسبی مساوی ۱ باشد و تغییر در میزان آلومینا تاثیری روی دانسیته نسبی نداشته باشد. هر چند باید ذکر کرد که این معادله در توافق با نتایج این پژوهش است[۱۹]. دلیل دیگر افزایش سختی با افزایش میزان ذرات تقویت کننده را باید اثر استحکام بخشی ذرات عنوان کرد.





در این پژوهش کامپوزیتAl- Al₂O₃ با درصدهای وزنی مختلف Al₂O₃ به روش SPS تولید شده و نتایج زیر به دست آمده است:

Al₂O₃ میتوان توزیع همگنی از ذرات Al₂O₃
در زمینه پودر آلومینیوم با درصدهای وزنی کم، حدود ۵ درصد
وزنی Al₂O₃ به دست آورد.

۲-نتایج آزمون فشار نشان میدهد که توزیع یکنواخت ذرات Al₂O₃ بین ذرات آلومینیوم در نمونه حاوی ۵ درصد وزنی، باعث افزایش استحکام آن می شود؛ اما با افزایش درصد Al₂O₃

40

35

با اعمال فشار حدود۸۰۰Mpa، در دمای۶۲۵°۲۵ به مدت زمان۴۵دقیقه انجام شده و به نتایج تقریباً مشابه دست یافته شده است. که روش پلاسمای جرقهای با توجه به مدت زمان، فشار و دمای اعمالی به لحاظ اقتصادی مقرون به صرفهتر است. در این روش فشار کمتری نسبت به سایر روشها لازم است.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از مسئولین محترم آزمایشگاه مرکزی دانشگاه فردوسی مشهد، به ویژه سرکار خانم مهندس هوشیار صادقیان به جهت انجام مطالعات میکروسکوپ الکترونی روبشی، تشکر و قدردانی مینمایند.

References:

1-Z. R. Hesabi, A. Simchi, S. S. Reihani. "Structural evolution during mechanical milling of nanometric and micrometric Al 2 O 3 reinforced Al matrix composites". Materials Science and Engineering: A. 2006;428(1):159-68.

2-J. Han. Processing Microstructure Evolution and Properties of Nanoscale Aluminum Alloys: University of Cincinnati; 2005.

3- M. Hossein-Zadeh, O. Mirzaee, P. Saidi. "Structural and mechanical characterization of Al-based composite reinforced with heat treated Al 2 O 3 particles". Materials & Design. 2014;54:245-50.

۴-م. باغچه سرا, ح. عبدی زاده, ح. بهاروندی. "بررسی ریز ساختار کامپوزیتهای زمینه آلومینیوم با فاز تقویت کننده نانو منیزیا تولید شده به روش اختلاط مستقیم". فصلنامه علمی-پژوهشی مواد نوین. ۵٬۲۰۱۵(۱۸):۱۱۲-۲۸.

5-K. Edalati, M. Ashida, Z. Horita, T. Matsui, H. Kato. "Wear resistance and tribological features of pure aluminum and Al–Al 2 O 3 composites consolidated by high-pressure torsion". Wear. 2014;310(1):83-9. در نمونههای حاوی ۱۰و۵۵درصد وزنی، قابلیت فشرده شدن کمتر شده و تخلخل افزایش مییابد. در حین اعمال تنش، این نقاط به عنوان نقاط تمرکز تنش عمل کرده و منجر به افت استحکام شد.

۳-افزایش درصد وزنی Al₂O₃ در نمونههای حاوی ۱۰و۱۵ درصد، قابلیت تراکم پذیری کاهش یافته و منجر به کاهش دانسیته نسبی از حدود۰/۹۸ به ۰/۸۸ شد.

۴- با افزایش درصد Al₂O₃ سختی برینل نمونهها تا حدود۹۵٪ افزایش یافته است.

۵-با استفاده از روش پلاسمای جرقهای، با اعمال فشار حدود ۳۲Mpa در دمای حدود^C۵۰۵۶تف جوشی پودر آلومینیوم به خوبی در مدت زمان ۴۵۰ثانیه اتجام شد. این درحالی است که تف جوشی پودر آلومینیوم، در روشهای معمول و سنتی[۱۷]

6-G. Zhao, Z. Shi, N. Ta, G. Ji, R. Zhang. "Effect of the heating rate on the microstructure of in situ Al 2 O 3 particlereinforced Al matrix composites prepared via displacement reactions in an Al/CuO system". Materials & Design. 2015;66:492-7.

7-M. Rahimian, N. Ehsani, N. Parvin, H. reza Baharvandi. "The effect of particle size, sintering temperature and sintering time on the properties of Al–Al 2 O 3 composites, made by powder metallurgy". Journal of Materials Processing Technology. 2009;209(14):5387-93.

8-G. Iacob, V. G. Ghica, M. Buzatu, T. Buzatu, M. I. Petrescu. "Studies on wear rate and micro-hardness of the Al/Al 2 O 3/Gr hybrid composites produced via powder metallurgy". Composites Part B: Engineering. 2015;69:603-11.

9-Z. Munir, U. Anselmi-Tamburini, M. Ohyanagi. "The effect of electric field and pressure on the synthesis and consolidation of materials: a review of the spark plasma sintering method". Journal of Materials Science. 2006;41(3):763-77.

10-J. Liu, Y. Wang, F. Yang, K. Chen, L. An. "Grain refining in spark plasma sintering Al 2 O 3 ceramics". Journal of Alloys and Compounds. 2015;622:596-600.

11-J. Monnier, Y. Champion, L. Perrière, B. Villeroy, C. Godart. "Spark plasma sintering and hydrogen pre-annealing of copper nanopowder". Materials Science and Engineering: A. 2015;621:61-7.

12-D. Perera, M. Tokita, S. Moricca. "Comparative study of fabrication of Si 3 N 4/SiC composites by spark plasma sintering and hot isostatic pressing". Journal of the European Ceramic Society. 1998;18(4):401-4.

13- S.-X. Song, Z. Wang, G.-P. Shi. "Heating mechanism of spark plasma sintering". Ceramics International. 2013;39(2):1393-6.

14-E. A. Olevsky, S. Kandukuri, L. Froyen. "Consolidation enhancement in spark-plasma sintering: Impact of high heating rates". Journal of Applied Physics. 2007;102(11):114913.

15-S. Diouf, A. Molinari. "Densification mechanisms in spark plasma sintering: effect of particle size and pressure". Powder technology. 2012;221:220-7.

16-H. Kwon, M. Leparoux, A. Kawasaki. "Functionally Graded Dual-nanoparticulatereinforced Aluminium Matrix Bulk Materials Fabricated by Spark Plasma Sintering". Journal of Materials Science & Technology. 2014;30(8):736-42.

17-A. Ebrahimnejad, S. A. Sajjadi. "Damage mechanisms in aluminum-matrix composites reinforced with nano-alumina particles". International Journal of Materials Research. 2015;106(10):1107-10.

18-M. Rahimian, N. Parvin, N. Ehsani. "Investigation of particle size and amount of alumina on microstructure and mechanical properties of Al matrix composite made by powder metallurgy". Materials Science and Engineering: A. 2010;527(4):1031-8.

19-M. Rahimian, N. Parvin, N. Ehsani. "The effect of production parameters on microstructure and wear resistance of powder metallurgy Al–Al 2 O 3 composite". Materials & Design. 2011;32(2):1031-8.