

تولید نانوکامپوزیت‌های زمینه فلزی به روش ریخته‌گری گردابی: پیشرفت‌ها و چالش‌ها

مریم حسین‌پور، حسن عبدوس*

دانشکده نانو فناوری، پردیس علوم و فناوری‌های نوین، دانشگاه سمنان، سمنان

چکیده

امروزه نانوکامپوزیت‌های زمینه فلزی به دلیل ویژگی فوق‌العاده‌ای مانند سختی، نسبت استحکام به وزن و مدول بالا کاربردهای گسترده‌ای در صنایع متفاوت از جمله هوافضا و اتومبیل‌سازی یافته‌اند. اما هزینه بالای تولید این دسته از مواد یکی از مهمترین چالش‌های پیش‌روی این صنایع است. روش ریخته‌گری گردابی به عنوان یکی از مقرون به صرفه‌ترین و ساده‌ترین روش‌های ساخت این مواد شناخته می‌شود. پیشرفت‌های اخیر مانند کاربرد امواج مافوق صوت در روش ریخته‌گری گردابی و یا روش ریخته‌گری گردابی دو مرحله‌ای منجر به تولید نانوکامپوزیت‌های زمینه فلزی با خواص مکانیکی و تریبولوژیکی فوق‌العاده شده است. در مقاله حاضر، پس از دسته‌بندی نانوکامپوزیت‌ها برحسب نوع تقویت‌کننده و جنس زمینه به بررسی انواع روش‌های ساخت آن‌ها پرداخته شده و در بین روش‌های موجود فرایند ریخته‌گری گردابی به دلیل سادگی، انعطاف‌پذیری و در دسترس بودن به عنوان روشی مقرون به صرفه برای تولید نانوکامپوزیت‌های زمینه فلزی مورد بررسی قرار گرفته است. در انتها نیز تاثیر تکنیک‌های جدید بر بهبود خواص نانوکامپوزیت‌های زمینه فلزی و چالش‌های مطرح بررسی شد.

واژه‌های کلیدی: نانوکامپوزیت‌های زمینه فلزی، ریخته‌گری گردابی، امواج مافوق صوت.

ایمیل نویسنده مسئول: h.abdoos@semnan.ac.ir

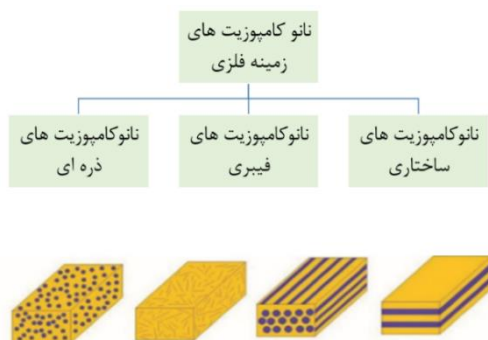
۱- مقدمه

بسیار ریز باشند. الیاف به دو دسته پیوسته و گسسته تقسیم می‌شوند و الیاف گسسته خود به دو دسته الیاف با جهت‌گیری منظم و الیاف با جهت‌گیری نامنظم و تصادفی تقسیم می‌شوند. نانوکامپوزیت‌های ساختاری با تقویت‌کننده‌هایی که به صورت لایه‌ای هستند، تقویت می‌شوند. این دسته از کامپوزیت‌ها به صورت لایه لایه و یا ساندویچی شده ساخته می‌شوند [۳].

کامپوزیت‌ها دسته‌ای از مواد هستند که از ترکیب دو یا بیش از دو نوع ماده تشکیل شده‌اند که در مقیاس ماکروسکوپی مجزا از هم باقی مانده و با هم واکنش شیمیایی نمی‌دهند. مواد کامپوزیتی از دو بخش اصلی شامل زمینه یا ماتریس و تقویت‌کننده تشکیل شده‌اند [۱]. معمولاً زمینه و تقویت‌کننده ویژگی بسیار متفاوتی دارند، برای مثال فلزات چکش‌خوار وقتی با سرامیک‌های ترد و مستحکم ترکیب می‌شوند ماده‌ای تولید می‌شود که ویژگی بهبود یافته به‌طور کامل متفاوت از فلزات و سرامیک‌ها را نشان می‌دهد [۲].

اگر تقویت‌کننده‌ها نانومتری باشند، یا دانه‌بندی ماتریس در مقیاس نانو باشد و یا همزمان این دو مورد رخ دهد، آنگاه ماده مورد نظر نانوکامپوزیت نامیده می‌شود.

همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، تقویت‌کننده‌ها به سه دسته ذره‌ای، الیاف و یا ساختاری تقسیم می‌شوند. ذرات می‌توانند درشت یا



شکل ۱. دسته بندی نانوکامپوزیت‌ها بر حسب نوع تقویت کننده

در یک تقسیم‌بندی دیگر نانوکامپوزیت‌ها بر اساس جنس زمینه به سه دسته فلزی، سرامیکی و پلیمری تقسیم می‌شوند. امروزه نانوکامپوزیت‌های زمینه فلزی به دلیل ویژگی فوق‌العاده‌ای مثل سبکی، نسبت استحکام به وزن بالا، سختی و مدول الاستیک بالا، حساسیت کم به شوک‌های حرارتی و غیره بسیار مورد توجه و حائز اهمیت هستند. همچنین این مواد به‌تازگی به دلیل توانایی تغییر خصوصیات فیزیکی‌شان از قبیل چگالی، ضریب انبساط حرارتی، توانایی انتشار گرما و ویژگی‌های مکانیکی مانند رفتارهای کششی و فشاری، خزش، رفتار تریبولوژیکی و غیره از طریق تغییر فاز تقویت‌کننده، بسیار مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته‌اند [۴ و ۵].

افزایش تقاضا برای مواد پیشرفته در صنایع هوا فضا و اتموبیل سازی و سایر حوزه‌ها منجر به توسعه سریع این مواد شده است. آلومینیم، منیزیم، تیتانیم و مس به کرات به عنوان زمینه فلزی استفاده شده‌اند. اما هزینه ساخت این گروه از مواد همچنان بالاست که این مشکل با کاربرد تقویت‌کننده‌های ارزان‌تر و به کارگیری روش‌های ساده‌تر ساخت برطرف می‌شود. لذا همواره یافتن روش‌های ساخت ارزان‌تر و ساده‌تر مسئله مورد علاقه بسیاری از پژوهشگران بوده است.

بر این اساس، می‌توان روش‌های ساخت را به دو گروه اصلی روش‌های حالت جامد و روش‌های فاز مایع تقسیم‌بندی کرد. از جمله روش‌های حالت جامد می‌توان آلیاژسازی مکانیکی و آسیاب‌کاری مکانیکی را نام برد و از روش‌های حالت مایع می‌توان ریخته‌گری گردابی، ریخته‌گری فشاری و ریخته‌گری پاششی را نام برد. در این میان روش ریخته‌گری گردابی یکی از مقرون به صرفه‌ترین و اقتصادی‌ترین روش‌های تولید نانوکامپوزیت‌های زمینه فلزی است. به طوری که هزینه تولید در این روش به یک سوم هزینه ساخت با سایر روش‌ها کاهش می‌یابد و در تولید انبوه هزینه ساخت حتی تا یک دهم نیز کاهش می‌یابد. این روش نخستین بار در سال ۱۹۶۸ ابداع شد. زمانی که اس.ری (S.Ray) ذرات آلومینا را با روش هم‌زدن آلیاژهای مذاب وارد مذاب آلومینیم کرد [۶ و ۷ و ۸].

ریخته‌گری گردابی برای ساخت کامپوزیت‌هایی با کسر حجمی تا ۳۰٪ حجم تقویت‌کننده مناسب است. گاهی برای کاهش تخلخل، ریزش ساختار شدن و همگن‌سازی توزیع فاز تقویت‌کننده، کامپوزیت‌های ریخته‌گری شده اکستروود می‌شوند [۵].

همانطور که در شکل ۲-الف نشان داده شده است در ریخته‌گری گردابی فاز تقویت‌کننده از طریق هم‌زدن‌های مکانیکی در ماتریس مذاب پخش می‌شود. به این صورت که در ابتدا ماتریس فلز تا دمایی بیش از نقطه ذوبش حرارت داده می‌شود تا کاملاً ذوب شود سپس به وسیله یک همزن، مذاب هم‌زده می‌شود تا جریان گردابی در آن تشکیل شود سپس تقویت‌کننده‌ها افزوده می‌شوند و فرایند هم‌زدن ادامه پیدا می‌کند تا تقویت‌کننده‌ها به توزیع یکنواختی برسند و در این مرحله مذاب به داخل قالب ریخته و منجمد می‌شود [۷ و ۸].

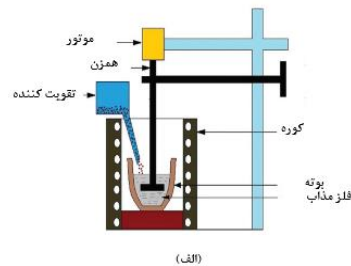
از جمله مزیت‌های روش ریخته‌گری گردابی می‌توان سادگی، انعطاف‌پذیری و کاربرد آن در تولید انبوه را نام برد. در واقع ریخته‌گری گردابی این امکان را می‌دهد تا از یک مسیر معمولی و رایج ساخت فلزات برای تولید نانوکامپوزیت‌ها استفاده شود و از این رو هزینه نهایی فرآورده را به حداقل می‌رساند. این روش اقتصادی‌ترین روش در بین تمام فرایندهای موجود برای تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی است و امکان ساخت قطعات به‌طور کامل بزرگ به کمک این روش فراهم است [۱].

می‌تواند تعیین‌کننده ساختار نانوکامپوزیت نهایی باشد به طوری که دماهای بارریزی پایین‌تر منجر به تشکیل ساختارهای هم‌محور و ریزدانگی بیشتر می‌شود در حالی که در دماهای بالاتر رشد ستونی رخ می‌دهد [۹]. به هر حال برای اطمینان از جریان مطلوب مذاب در حین بارریزی و جلوگیری از رشد نامطلوب دانه‌ها، باید دمای ریختن مذاب به داخل قالب به اندازه کافی بالا باشد. برای رسیدن به توزیع بهینه نانوذرات در داخل زمینه لازم است که مشخصات همزن مکانیکی نیز بهینه شود بر این اساس مشخص شده است که همزن با زوایای ۴۵ و ۶۰ درجه به بهترین توزیع ذرات منجر می‌شود. همچنین برای حصول به بهترین توزیع لازم است که تعداد پره‌ها ۴ عدد بوده و همزن طوری تعبیه شود که ۶۵ درصد مذاب بالای پره‌های همزن و ۳۵ درصد آن زیر همزن قرار بگیرد [۱۰ و ۱۱]. اتمسفر انجام فرایند نیز در خصوصیات نانوکامپوزیت نهایی تأثیر گذار است، به طوری که وجود اکسیژن در محیط هر چند با ایجاد یک لایه اکسیدی روی مذاب مانع اکسیداسیون بیشتر مذاب می‌شود اما شکستن این لایه اکسیدی خود یک بحث چالش برانگیز است. به این منظور سعی می‌شود واکنش در محیط گاز بی‌اثر انجام شود و نرخ گاز بی‌اثر خود یکی از متغیرهای موثر در این روش است [۶]. پیش-گرم کردن قالب منجر به انبساط آن گردیده و مانع از گسیختن احتمالی آن حین ریختن مذاب می‌شود. نرخ تغذیه ذرات تقویت‌کننده نیز باید طوری تنظیم شود که تا حد امکان مانع از کلوخه‌ای شدن نانوذرات و تشکیل خوشه‌ها شود. همچنین افزودن عناصری مثل منیزیم نیز در خصوصیات نانوکامپوزیت تولیدی تأثیرگذار است [۹ و ۱۰].

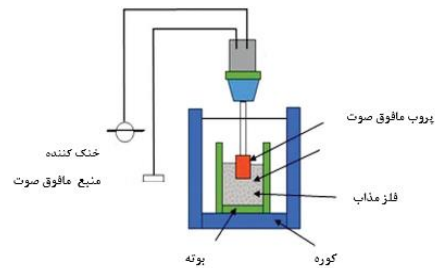
۳- پیشرفت‌های اخیر در روش ریخته‌گری گردابی

ریخته‌گری گردابی دو مرحله‌ای، ریخته‌گری گردابی سه‌مرحله‌ای، ریخته‌گری گردابی به کمک امواج التراسونیک و ریخته‌گری گردابی به کمک امواج الکترومغناطیسی تکنیک‌هایی هستند که اخیراً برای ساخت نانوکامپوزیت‌های زمینه فلزی بکار گرفته شده‌اند [۸ و ۴ و ۵ و ۱].

در ریخته‌گری دو مرحله‌ای ابتدا زمینه مورد نظر تا دمایی بیش از نقطه آن حرارت داده می‌شود تا کاملاً ذوب شده و سپس تا رسیدن به یک حالت نیمه جامد سرد می‌شود. در این زمان تقویت‌کننده‌ها



(الف)

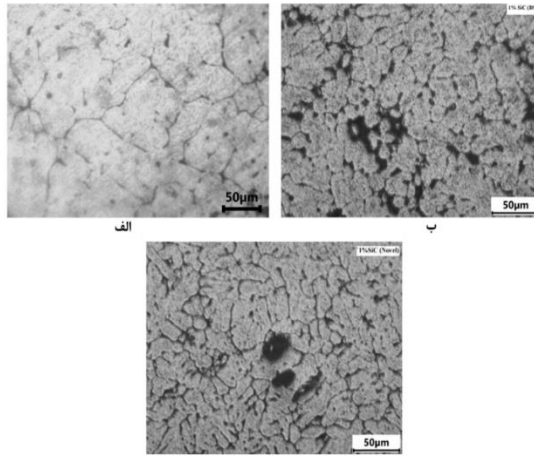


(ب)

شکل ۲. الف: روش ریخته‌گری گردابی ب: روش ریخته‌گری گردابی به کمک امواج مافوق صوت

۲- عوامل موثر در فرایند

از جمله عوامل موثر در روش ریخته‌گری گردابی می‌توان به زمان، دما و سرعت همزدن محل قرارگیری تیغه‌های همزن و تعداد تیغه‌ها، پیش-گرم کردن تقویت‌کننده‌ها و قالب، اتمسفر انجام فرایند و نرخ تزریق تقویت‌کننده‌ها اشاره کرد. دقت در انتخاب مناسب مقدار هریک از این عوامل و بهینه‌سازی آن می‌تواند منجر به تولید نانوکامپوزیتی با حداقل نقایص شود. برای مثال دمای همزدن که کاملاً وابسته به دمای ذوب زمینه است می‌تواند به طور مستقیم بر گرانروی مذاب و در نتیجه توزیع تقویت‌کننده‌ها تأثیرگذار باشد و یا بهتر است سرعت همزدن طوری تنظیم شود که جریان مذاب از درون به بیرون و به صورت اغتشاشی باشد تا بهترین توزیع و پخش‌شدگی تقویت‌کننده‌ها حاصل شود [۱]. همچنین پیش-گرمایش تقویت‌کننده‌ها منجر به زدودن آلودگی‌ها و گازهای به دام افتاده بین ذرات می‌شود که این امر در کاهش تخلخل‌ها و بهبود ویژگی مکانیکی نانوکامپوزیت موثر است. برای مثال، رطوبت موجود بر سطح نانوذرات زمانی که ذرات وارد مذاب می‌شوند در اثر حرارت تجزیه شده و اکسیژن با فلز مذاب وارد واکنش می‌شود و هیدروژن آن در درون مذاب باعث تشکیل حفرات و تخلخل می‌شود. دمای ریختن مذاب به داخل قالب



شکل ۳. ریزساختار الف: زمینه AA715 ب: نانوکامپوزیت تولیدی به روش ریخته‌گری دومرحله‌ای پ: نانوکامپوزیت تولیدی به روش ریخته‌گری گردابی با امواج مافوق صوت [۸]

به آن اضافه شده و کاملاً مخلوط می‌شوند. مجدداً مخلوط حاصل حرارت داده می‌شود تا کاملاً ذوب شود و سپس مذاب حاصل در قالب ریخته می‌شود [۴].

در روش سه‌مرحله‌ای در ابتدا تقویت‌کننده‌ها با پودر فلزی از جنس ماتریس آسیاب‌کاری مکانیکی می‌شود و بعد مراحل مذکور طی می‌شود. کاربرد امواج مافوق صوت در روش ریخته‌گری گردابی تأثیر بسزایی بر توزیع ذرات، کاهش تخلخل‌ها و بهبود ویژگی مکانیکی دارد. در این روش برای مخلوط‌سازی بهینه تقویت‌کننده‌ها در زمینه از امواج مافوق صوت استفاده می‌شود. در اثر تابش این امواج حباب‌هایی در داخل مذاب تشکیل می‌شود و انرژی حاصل از انفجار این حباب‌ها تأثیر بسزایی روی شکسته شدن خوشه‌ها و توزیع بهینه نانوذرات خواهند داشت. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده کاربرد امواج مافوق صوت سبب رسیدن به دانه‌بندی ریزتر، توزیع یکنواخت-تر تقویت‌کننده‌ها و شکسته شدن خوشه‌های نانوذرات می‌شود. در واقع تابش امواج مافوق صوت به داخل مذاب منجر به تشکیل تعداد زیادی حباب می‌شود. دمای داخل این حباب‌ها تا بیش از ۵۰۰۰ درجه سلسیوس می‌رسد و فشار درون آن نیز از ۱۰۰۰ اتمسفر تجاوز می‌کند. بنابراین به دلیل اختلاف فشاری که در بیرون و درون حباب‌ها وجود دارد حباب‌ها منفجر می‌شوند و انرژی حاصل از انفجار آن‌ها از یک طرف باعث شکسته شدن خوشه‌ها شده و از طرف دیگر انتشار موج ایجاد شده با امواج مافوق صوت، باعث حرکت ذرات تقویت‌کننده می‌شود بنابراین به پخش و توزیع بهتر ذرات تقویت‌کننده منجر خواهد شد [۸]. حضور نانوذرات در مرز دانه‌ها با جلوگیری از رشد دانه منجر به ایجاد ساختارهای با دانه‌بندی ریزتر می‌شود. لذا همانطور که شکل ۴ قابل مشاهده است استفاده از روش ریخته‌گری گردابی با امواج مافوق صوت در مقایسه با روش ریخته‌گری دو مرحله‌ای منجر به کاهش تخلخل، توزیع بهتر ذرات تقویت‌کننده، بهبود ویژگی مکانیکی و تریبولوژیکی نانوکامپوزیت‌های تولید شده خواهد شد.

در نهایت، در روش ریخته‌گری به کمک امواج الکترومغناطیسی پژوهشگران از موتورهای الکترومغناطیسی برای به حرکت در آوردن همزن‌های مکانیکی استفاده کرده‌اند [۱۱].

وارد کردن تقویت‌کننده‌ها به داخل مذاب روش‌های متعددی پیشنهاد شده است. از آن جمله می‌توان به تزریق ذرات تقویت‌کننده موجود در گاز بی اثر به وسیله گان (تفنگ) تزریق، اضافه کردن ذرات تقویت‌کننده به مذاب حین ریختن آن به داخل قالب، استفاده از روش‌های سانتریفیوژ، کاربرد امواج مافوق صوت و روش جاذبه صفر اشاره کرد [۱۰]. در این میان روش گردابی یکی از بهترین روش‌های پیشنهاد شده برای توزیع بهینه ذرات تقویت‌کننده در داخل زمینه است.

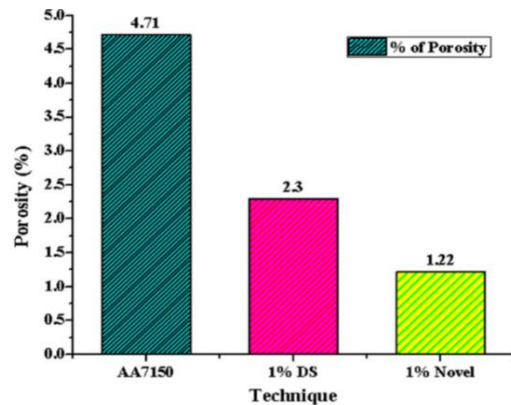
۴-۲- ترشوندگی

ترشوندگی به صورت توانایی یک مایع در ترکردن سطح جامد تعریف می‌شود [۲]. مقدار ترشوندگی از طریق رابطه زیر که رابطه یانگ (Young) نامیده می‌شود تعریف می‌شود.

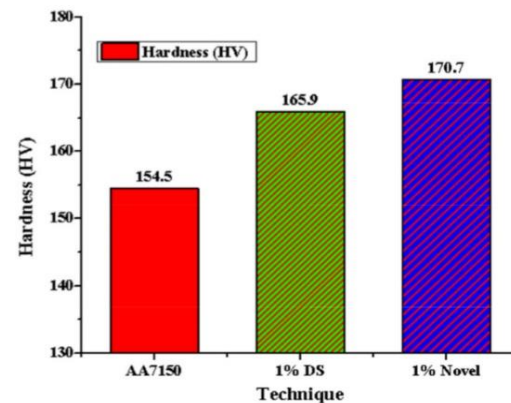
$$\sigma_S = \sigma_{SL} + \sigma_L \cos \theta$$

که در این رابطه σ_S و σ_{SL} و σ_L به ترتیب معرف

انرژی آزاد سطحی جامد، کشش سطحی بین جامد و مایع و کشش سطحی مایع مشخص می‌شود طبق این رابطه در زاویه صفر، ترشوندگی کامل و در زاویه 180° درجه ترشوندگی صفر خواهد بود. در زوایای بین 0° تا 90° ترشوندگی مطلوب و زوایای بین 90° تا 180° ترشوندگی ضعیفی خواهند داشت [۱۰]. برای رسیدن به سطح بالایی از ویژگی مکانیکی باید ترشوندگی خوبی بین تقویت‌کننده‌ها و زمینه وجود داشته باشد تا پیوندهای فصل مشترکی خوبی بین آن‌ها ایجاد شود. بر این اساس متغیرهایی مثل افزایش انرژی سطح جامد، کاهش کشش سطحی آلیاژ زمینه مایع، کاهش انرژی فصل مشترک ذرات و زمینه برای بهبود ترشوندگی الزامی است. رویکردهای متفاوتی برای افزایش ترشوندگی ذرات تقویت‌کننده توسط مذاب زمینه اتخاذ شده است. نیکل و مس به خوبی با استفاده از بیشتر آلیاژها تر می‌شوند و به همین دلیل برای تعدادی از آلیاژهای مذاب با ترشوندگی پایین استفاده می‌شوند [۱۰]. یکی از راه‌های بهبود ترشوندگی پوشش‌دهی فاز تقویت‌کننده است. پوشش‌دهی نه تنها انرژی فصل مشترک را کاهش می‌دهد بلکه از ایجاد واکنش شیمیایی بین تقویت-



الف



ب

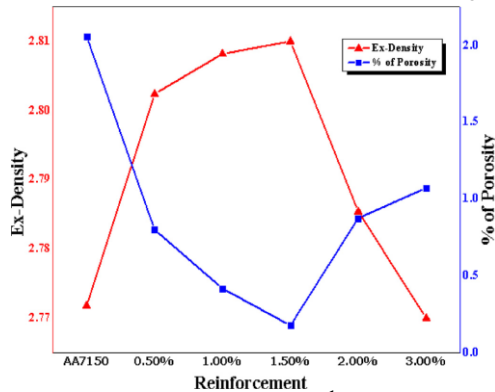
شکل ۴. الف: تخلخل ب: سختی در آلیاژ AA715، نانوکامپوزیت تولیدی به روش ریخته‌گری دومرحله‌ای و نانوکامپوزیت تولیدی به روش ریخته‌گری گردابی با امواج مافوق صوت

۴-چالش‌های مطرح در روش ریخته‌گری گردابی توزیع یکنواخت ذرات تقویت‌کننده، ترشوندگی، تخلخل‌ها و واکنش‌های شیمیایی بین زمینه و تقویت‌کننده‌ها از مهمترین چالش‌های روش ریخته‌گری گردابی است [۱۰ و ۲].

۴-۱- توزیع یکنواخت ذرات تقویت‌کننده

عوامل متعددی مثل استحکام مخلوط، شرایط ترشوندگی ذرات و مذاب، نرخ انجماد، چگالی نسبی، هندسه همزن، مکان همزن، دمای مذاب، ویژگی ذرات افزوده بر توزیع ذرات در جامد نهایی موثر هستند. همچنین توزیع تقویت‌کننده‌ها طی سه مرحله الف: توزیع در مایع در نتیجه مخلوط شدن، ب: توزیع در مایع بعد از مخلوط شدن و پیش از انجماد، ج: توزیع مجدد ذرات در نتیجه انجماد تحت تاثیر قرار می‌گیرد. برای

مشترکی خوبی بین زمینه و تقویت‌کننده‌ها ایجاد می‌شود.



شکل ۵. تغییرات چگالی و تخلخل بر حسب درصد وزنی تقویت‌کننده‌ها [۵]

همچنین، حضور تقویت‌کننده‌ها سبب جلوگیری از حرکت نابجایی‌ها شده و از طریق سازوکار استحکام بخشی اوروان سبب بهبود ویژگی مکانیکی نانوکامپوزیت نهایی می‌شود. شکل ۶. الف و ب نشان می‌دهد که افزایش چگالی و کاهش تخلخل‌ها باعث افزایش سختی، استحکام تسلیم نهایی و کرنش نانوکامپوزیت زمینه آلومینیم ساخته شده به روش ریخته‌گری گردابی به کمک امواج مافوق صوت می‌شود. همچنین بررسی ویژگی سایشی این نانوکامپوزیت نشان می‌دهد که نانوکامپوزیت حاوی ۵،۱ درصد وزنی تقویت‌کننده بالاترین مقاومت به سایش را در تمامی مقادیر بارگذاری دارا است (شکل ۷).

با توجه به زمینه‌های کاربرد نانوکامپوزیت‌های زمینه فلزی، بهبود ویژگی خوردگی این دسته از مواد یکی از مسائل مورد علاقه پژوهشگران بوده است. بررسی ویژگی خوردگی نانوکامپوزیت‌های هیبریدی زمینه آلومینیم تقویت شده با نانو ذرات کاربید سیلیسیم و کاربید تیتانیم تولید شده به روش ریخته‌گری گردابی دومرحله‌ای، شکل ۸، نشان می‌دهد که با افزایش درصد وزنی تقویت‌کننده‌ها چگالی جریان خوردگی کاهش می‌یابد و مقاومت به خوردگی این نانوکامپوزیت‌ها افزایش می‌یابد [۱۲].

کننده و زمینه جلوگیری می‌کند. به طور کلی این پوشش‌ها به سه منظور استفاده می‌شوند: الف: با هدف محافظت از ذرات تقویت‌کننده حین حمل و نقل، ب: برای بهبود ترشوندگی و ج: به منظور بهبود قابلیت توزیع قبل از اضافه شدن به زمینه. انواع پوشش‌ها بر حسب ترشوندگی به دو گروه پوشش‌هایی که با زمینه واکنش می‌دهند و پوشش‌هایی که با لایه اکسیدی فلزات واکنش می‌دهند، تقسیم می‌شوند [۱۰ و ۲].

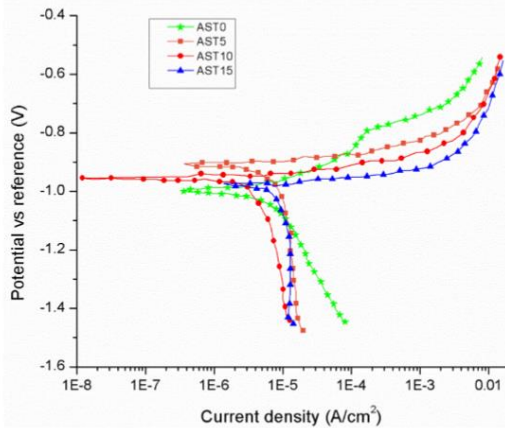
۳-۴- تخلخل‌ها

به طور کلی می‌توان فرایند تکامل گاز هیدروژن در حین فرایند، به دام افتادن گازها در زمان هم زدن و انقباضات حین انجماد را به عنوان سه منبع اصلی تولید حفرات و تخلخل‌ها نام برد [۱۰]. حفرات و تخلخل‌های موجود در ساختار نانوکامپوزیت با کاهش چگالی آن سبب افت ویژگی مکانیکی می‌شوند.

هرچند حضور تخلخل‌ها در روش ریخته‌گری گردابی اجتناب‌ناپذیر است، اما می‌توان با کنترل شرایط ساخت و انتخاب مناسب متغیرهای فرایند ساخت مقدار آن را به حداقل رساند. از جمله مهمترین متغیرهای فرایند که توسعه و تکامل تخلخل‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهند می‌توان به زمان نگهداری مذاب، سرعت هم‌زدن، اندازه و موقعیت هم‌زن اشاره کرد.

شکل ۵ مقدار تخلخل و چگالی نانوکامپوزیت زمینه آلومینیم تقویت شده با نانوذرات هگزابورون نیتريد با اندازه متوسط ۷۰ نانومتر که به روش ریخته‌گری گردابی با کمک امواج مافوق صوت تولید شده‌اند را، نشان می‌دهد [۵].

مطابق شکل ۵، با افزایش تقویت‌کننده‌ها تا مقدار ۵،۱ درصد وزنی استفاده از امواج مافوق صوت سبب شکسته شدن خوشه‌های نانوذرات و توزیع همگن آنها می‌شود که افزایش چگالی و کاهش مقدار تخلخل را به همراه دارد. در مقادیر بیشتر تقویت‌کننده به دلیل کلوخه شدن نانوذرات افت چگالی و افزایش تخلخل‌ها قابل مشاهده است. افزایش چگالی و کاهش تخلخل مستقیم بر ویژگی مکانیکی و تریبولوژیکی نانوکامپوزیت نهایی موثر خواهد بود. به دلیل حضور ذرات تقویت‌کننده با مساحت سطح بسیار بالا پیوندهای فصل



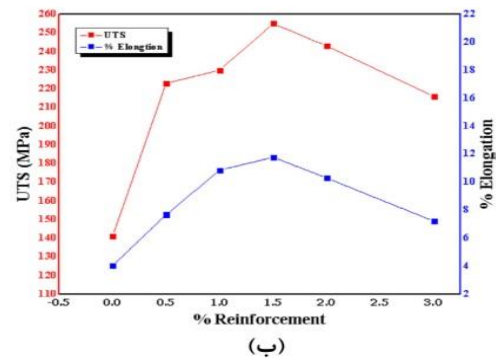
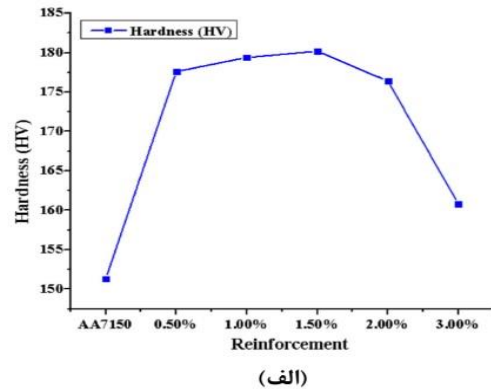
شکل ۸. منحنی‌های قطبش آلیاژ Al7075 و نانوکامپوزیت‌های آن در محلول ۳/۵% NaCl [۱۲]

۵. نتیجه‌گیری

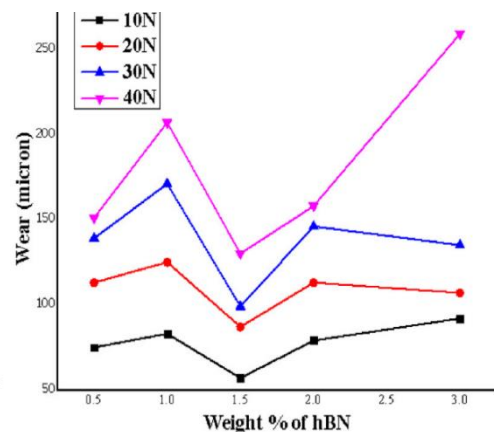
ریخته‌گری گردابی به دلیل سادگی، انعطاف‌پذیری و امکان تولید انبوه، یکی از مقرون به صرفه‌ترین روش‌های تولید نانوکامپوزیت‌های زمینه فلزی است. اعمال امواج مافوق صوت در روش ریخته‌گری گردابی منجر به بهبود چشمگیر ویژگی مکانیکی و تریبولوژیکی نانوکامپوزیت‌های زمینه آلومینیم می‌شود. استفاده از روش ریخته‌گری گردابی دو مرحله‌ای افزایش استحکام کششی، ریزسختی و کاهش تخلخل نانوکامپوزیت‌های زمینه آلومینیم را به همراه دارد. با کنترل شرایط ساخت و بهینه سازی متغیرهای موثر در روش ریخته‌گری گردابی می‌توان از این روش برای تولید نانوکامپوزیت‌های زمینه فلزی با ویژگی مکانیکی و تریبولوژیکی بهبود یافته با قیمت بسیار کمتر در مقایسه با سایر روش‌ها استفاده کرد.

۶. منابع

- [1] G.B. Rajeshkumar and M.S. Parshuram, International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT), 3(2), 2249 – 8958, (2013).
- [2] C. Bhaskar, K. Kandpal Jatinder, S. Hari, Materials Today: Proceedings, 5-10, (2018).
- [3] J.M. Mistry, P.P. Gohil, Science and Engineering of Composite Materials, 25(4), 633-647, (2018).
- [4] K.M.S.K. Himanshu Kala, Procedia Materials Science, 6, 1951 – 1960, (2014).



شکل ۶. الف: سختی ب: استحکام تسلیم نهایی و کرنش بر حسب درصد وزنی تقویت کننده [۵]



شکل ۷. سایش بر حسب درصد وزنی تقویت کننده در بارگذاری‌های متفاوت [۵]



- [10] J. Hashim, L. Looney, M. Hashmi, *Journal of Materials Processing Technology*, 92-93, 1-7, (1999).
- [11] K. Abhishek, S. Lal, K. Sudhir, *Journal of Material Research Technoly*, 2(3), 250-254, (2013).
- [12] M. Sambathkumar, P. Navaneethakrishnan, K. Ponappa, K. Sasikumar, *Latin American Journal of Solids and Structures*, 14(02), (2017).
- [5] P. Madhukar, N. Selvaraj, C.S.P. Rao, G.V. Kumar, *Journal of Alloys and Compounds*, 815, 152464, (2020).
- [6] V. Sandra, G. Slobodan, S. Blaža, V. Aleksandar, *Applied Engineering Letters*, 1(3), 72-79, (2016).
- [7] M.K. Sahu, R.K. Sahu, In *Advanced Casting Technologies*. IntechOpen, (2018).
- [8] M. Pagidi, N. Selvaraj, G. Raghavendra, S.P.R. Chilakalapalli, *Ultrasonics - Sonochemistry*, 58, 104665, (2019).
- [9] C. Saravanan, K. Subramanian, K. Ananda, N. Sankara, *Mechanics and Mechanical Engineering*, 19(1), 23-30, (2015).