

بررسی تأثیر فرایند اکستروژن داغ بر ریز ساختار و خواص نانو کامپوزیت Al-B₄C تولید شده به روش ریخته گری گردابی

مقداد خادمیان*^۱، علی علیزاده^۲، حمیدرضا بهاروندی^۳، حسن مجیدی^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مجتمع مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

۲- استادیار، مجتمع مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

۳- دانشیار، مجتمع مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

۴- مجتمع مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

* m_khademyan@yahoo.com

(تاریخ دریافت: ۹۲/۰۹/۱۶، تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۲/۱۰)

چکیده

در این پژوهش اثر انجام فرایند اکستروژن داغ بر خواص و ریزساختار کامپوزیت آلومینیوم A-356 بررسی شد. برای ساخت کامپوزیت به روش ریخته‌گری گردابی، ذرات کاربید بور با قطر میانگین ۳۰۰nm، به مقدار ۳ درصد وزنی در مذاب آلومینیوم A-356، در دمای ۸۵۰°C به مدت ۱۵ دقیقه مخلوط و سپس در قالب فولادی ریخته‌گری شد. عملیات اکستروژن داغ در دمای ۳۵۰°C بر نمونه‌ها با نسبت ۱:۹ انجام گرفت. نتایج نشان داد بیشینه استحکام کششی نمونه کامپوزیتی اکستروژن شده برابر با ۳۰۹MPa است که نسبت به نمونه کامپوزیتی قبل از عملیات اکستروژن داغ ۷۴٪ و نسبت به نمونه آلومینیومی ریخته‌گری فاقد ذرات تقویت کننده، حدود دو برابر افزایش یافته است. هم چنین بررسی‌ها نشان داد که عملیات اکستروژن داغ باعث می‌شود که نوع شکست نمونه‌ها بیشتر به نوع شکست نرم نزدیک شود.

واژه‌های کلیدی:

ریخته‌گری گردابی، اکستروژن داغ، کاربید بور، آلومینیوم ۳۵۶، خواص مکانیکی.

۱- مقدمه

۵- فرایندهای درجا^۴[۱].
روش ریخته‌گری گردابی به جهت سادگی فرایند، تکرارپذیری، تنوع در سایز و امکان تولید قطعات بسیار بزرگ و قیمت تمام شده مناسب، روشی بسیار قابل قبول و کارا می‌باشد[۲].
هم‌چنین رنج وسیعی از تقویت‌کننده‌ها با شکل و اندازه مختلف را می‌توان در این روش به کار گرفت. میزان خسارت وارده بر ذرات تقویت کننده در این روش بسیار پایین‌تر از دیگر روش‌ها

کامپوزیت‌های زمینه فلزی را می‌توان به دو روش کلی حالت جامد و حالت مایع تولید نمود. روش‌های متداول در تولید حالت مایع عبارتند از:

۱- رخنه دهی^۱

۲- ریخته‌گری گردابی

۳- ریخته‌گری کوبشی^۲

۴- فرایند هم‌رسوبی پاششی^۳

نمونه های کامپوزیتی پژوهش هایی انجام شده است، به عنوان مثال امامی و همکاران در مورد اثر اکستروژن داغ بر ریز ساختار و استحکام کامپوزیت Al6061-SiC تحقیقاتی انجام دادند [۸]. سون و همکاران نیز اثر متغیرهای اکستروژن داغ را بر خواص کششی کامپوزیت Al2124-SiC را بررسی کردند [۹]. هم چنین کانگ و همکارانش به بررسی اکستروژن داغ کامپوزیت Al-Cu پرداختند [۱۰] اما در مورد اثر اکستروژن داغ بر خواص و ریزساختار کامپوزیت آلومینیوم A356-B₄C به روش ریخته‌گری گردابی بررسی انجام نشده است.

در تحقیق حاضر به منظور رسیدن به کامپوزیت مناسب از مقادیر بهینه درصد حجمی ذرات، شکل ذرات، زمان هم زدن، شکل و زاویه همزن و دیگر متغیرهای موثر در روش ریخته‌گری گردابی و نیز متغیرهای موثر در فرایند اکستروژن داغ مثل دمای فرایند، نوع، سرعت و نسبت اکستروژن و نیز شرایط بهینه اصطکاکی بین قالب و قطعه استفاده شد.

۲- مواد و روش انجام آزمایش

از آلیاژ A-356 به عنوان زمینه کامپوزیت استفاده شد. ترکیب شمش این آلیاژ مطابق با جدول (۱) است.

جدول (۱): ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم A-356 (درصد وزنی)

عنصر	Al	Si	Fe	Cu	Mg	Mn	Zn	Ti	Ni
درصد وزنی	۹۱/۷۷	۰/۷	۰/۲۰	۰/۲۰	۰/۳۸	۰/۱۰	۰/۱۰	۰/۲۰	۰/۰۵

طراحی گردید.

می باشد که این مزیت باعث افزایش استحکام نهایی قطعه می - گردد. متغیرهای اصلی موثر بر محصول نهایی در این روش عبارت از پخش ذرات تقویت کننده، میزان ترشوندگی ذرات به وسیله زمینه و میزان تخلخل نهایی قطعه است [۳]. کاربرد بور پس از الماس و نیتريد بور مکعبی سخت ترین ماده در جهان می - باشد. این ماده که به رنگ خاکستری مایل به سیاه است، ساختار کریستالی سوزنی رمبوهدرال و یا صفحه‌ای هگزاگونال دارد [۴]. با توجه به این موضوع که این ماده کم ترین چگالی را در بین مواد فوق سخت در حدود $2/54 \text{ gr/cm}^3$ دارد، هم چنین دیرگدازی بالای آن و عدم کاهش سختی و استحکام آن تا دماهای بالا (در حدود 1300°C)، مقاومت مناسب به خوردگی و حملات شیمیایی و قیمت مناسب آن، کاربرد این ماده به عنوان تقویت کننده در کامپوزیت‌های زمینه فلزی در حال گسترش است [۵-۶].

معمولاً زمانی که کامپوزیت به وسیله روش ریخته‌گری گردابی یا دیگر روش‌های ریخته‌گری تولید می‌شود، دارای مشکلاتی از جمله تخلخل بالا، آگلومراسیون^۵ ذرات ثانویه، عدم پخش مناسب فاز تقویت کننده، جهت‌گیری نامناسب ذرات و غیره می‌باشد. استفاده از فرآیندهای تکمیلی مکانیکی مثل اکستروژن، نورد و فرآیندهای مشابه باعث افزایش خواص مکانیکی و کاهش مشکلات مذکور می‌شود [۷].

در مورد اثر عملیات اکستروژن داغ بر خواص و ریز ساختار

سیستم ریخته‌گری از سه بخش اصلی کوره، همزن و قالب تشکیل شده است که در شکل (۱) مشاهده می‌شود. پروانه همزن از جنس گرافیتی با زاویه پره‌های 45° ساخته شده است. قالب ریخته‌گری فولادی به صورت مکعب مستطیل برای تهیه چهار نمونه استوانه‌ای به ابعاد ۱۵cm و قطر ۳cm در هر ذوب‌ریزی

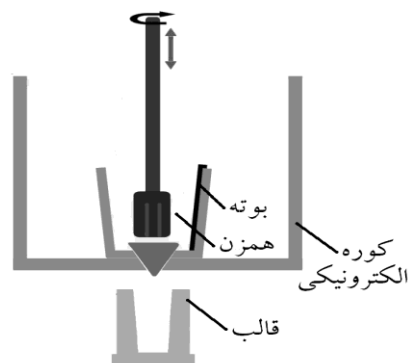


شکل (۲): نمونه‌ای از قطعه کامپوزیتی پس از عملیات آزمون کشش.

برای انجام فرایند اکستروژن داغ از تجهیزاتی استفاده شد که در دمای انجام فرایند، استحکام و سختی خود را حفظ کنند. برای این منظور از قالبی از جنس فولاد گرم کار H13 با سختی ۵۵HRC استفاده گردید. یک پرس هیدرولیک ۷۰۰ bar با سرعت جابه‌جایی سنبه حدود ۱ mm/s برای انجام عملیات به کار گرفته شد. برای گرم کردن قطعه و قالب از یک کوره مقاومتی که به شکل استوانه به دور آن‌ها قرار می‌گیرد، استفاده گردید. پس از نگهداری قطعه و قالب به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۳۵۰°C فرایند اکستروژن داغ با نسبت ۱:۹ انجام گرفت. برای محاسبه میزان تخلخل در نمونه‌های ریختگی و اکستروژن شده طبق استاندارد ISO2738، از دستگاه چگال سنج سارتیوس، مدل LA2305 بر اساس رابطه (۱) استفاده شد که در آن چگالی واقعی نمونه کامپوزیتی از قانون مخلوط‌ها و چگالی واقعی نمونه های کامپوزیتی به وسیله قانون ارشمیدس محاسبه شد.

$$(1) \quad \text{چگالی واقعی} - \text{چگالی تئوری} \\ \text{چگالی تئوری} \times 100 = \text{درصد تخلخل}$$

برای آماده‌سازی نمونه‌ها پس از سمباده‌زنی و پولیش قطعات، عملیات اچ کردن^۶ به وسیله محلول ۵ درصد اسید فلئوئوریدریک انجام گرفت [۱۲].



شکل (۱): نمایی شماتیک از کوره ذوب‌ریزی.

برای افزایش میزان ترشوندگی ذرات سرامیکی به وسیله مذاب آلومینیوم، ذرات به وسیله پودر آلومینیوم خالص با اندازه دانه متوسط ۱۰۰ μm و نسبت وزنی پودر آلومینیوم به پودر کاربید بور ۱:۲ پوشش دهی شد. این عملیات به وسیله دستگاه آسیاب مکانیکی سیاره‌ای در محیط الکل اتانول در دور ۳۰۰ rpm و زمان چرخش ۲۰ دقیقه انجام شد.

برای تعیین استحکام کششی قطعات ساخته شده از دستگاه آزمون کشش با حداکثر خطای اندازه‌گیری استحکام کششی تمامی نمونه‌ها معادل ۰/۰۵ استفاده شد. تعداد سه نمونه از هر ذوب‌ریزی بر اساس استاندارد ASTM-E8 جهت آزمون کشش آماده شد [۱۱]. جهت تهیه تصاویر سطوح شکست قطعات، از هر نمونه شکسته شده که در شکل (۲) مشاهده می‌شود پس از آزمون کشش، یک نمونه با ارتفاع حدود ۱۰ mm انتخاب و به وسیله دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی، به روش الکترون بازگشتی، عملیات توپوگرافی سطوح شکست انجام شد.

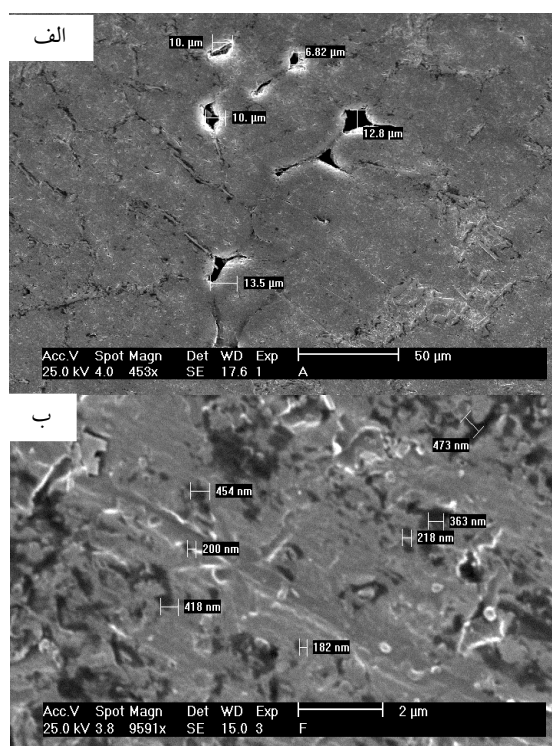
مقدار ۳ درصد وزنی از پودر B₄C پس از محاسبه درصد وزنی پودر سرامیکی پوشش داده شده و با در نظر گرفتن مقدار آلومینیوم روکش شده بر پودر، به مذاب در دمای ۸۵۰°C و زمان هم‌زدن ۱۵ دقیقه اضافه گردید. برای این منظور پودر کاربید بور پوشش داده شده با آلومینیوم خالص در فویل آلومینیومی قرار گرفته و داخل مذاب شد. سرعت همزن در همه مراحل ثابت و برابر با ۳۰۰ rpm در نظر گرفته شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- اثر اکستروژن داغ بر ریزساختار و خواص نمونه ها

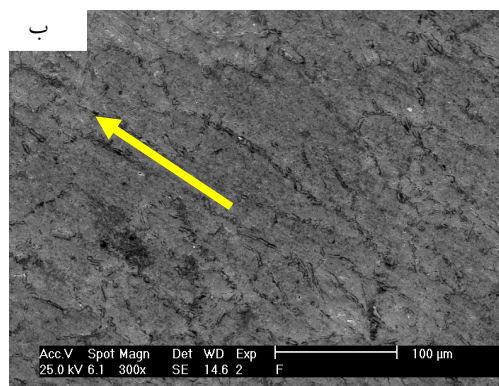
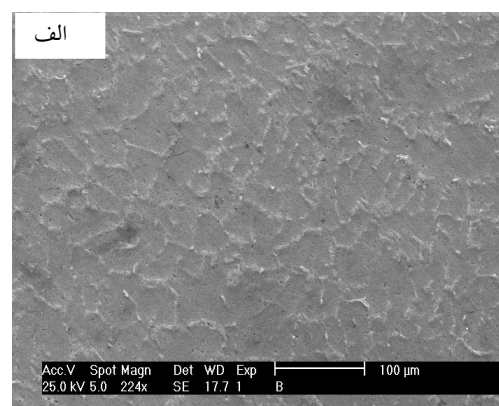
انجام عملیات اکستروژن داغ بر نمونه‌های کامپوزیتی ریختگی، باعث کوچک شدن اندازه دانه ها می شود. علت ریز دانگی نمونه ها علاوه بر تنش ناشی از عملیات اکستروژن، پدیده تبلور مجدد و رشد دانه‌هاست [۱۳]. در شکل (۳) دانه‌بندی نمونه ها در شرایط قبل و بعد از عملیات اکستروژن داغ مشاهده می‌شود. طبق محاسبات به عمل آمده بر اساس استاندارد ASTM-E112 توسط نرم افزار کلمکس، اندازه دانه نمونه قبل از عملیات اکستروژن داغ که در شکل (۳ الف) دیده می شود برابر با $10/1 \mu\text{m}$ و پس از عملیات (شکل ۳ ب) برابر با $12/9 \mu\text{m}$ اندازه گیری شد. یکی دیگر از اثرات اکستروژن داغ بر دانه ها، کشیدگی آنها در جهت اعمال نیروی اکستروژن می باشد. در شکل (۳ ب) به وضوح کشیدگی دانه‌ها در جهت محور اکستروژن دیده می‌شود.

تخلخل یکی از عیوب نمونه های کامپوزیتی تولیدشده به روش ریخته گری است که باعث افت محسوس در استحکام و دیگر خواص مکانیکی نمونه ها می‌شود. اکستروژن باعث کاهش چشمگیری در میزان تخلخل نمونه های کامپوزیتی می‌شود [۱۴]. در شکل (۴) نحوه پخش تخلخل قبل و بعد از عملیات اکستروژن داغ مشاهده می شود، کوچک شدن و پخش مناسب تر تخلخل ها پس از عملیات اکستروژن داغ به وضوح مشاهده می شود.



شکل (۴): اندازه و نحوه پخش تخلخل در نمونه ریخته گری گردابی (الف): قبل از عملیات اکستروژن داغ و (ب): پس از عملیات اکستروژن داغ

پس از محاسبات چگالی به روش ارشمیدس همان طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود میزان تخلخل نمونه های کامپوزیتی $2/052$ درصد بوده که پس از انجام عملیات اکستروژن داغ به $0/35$ درصد کاهش می‌یابد که این افزایش قابل توجه در چگالی قطعات به علت از بین رفتن تخلخل های ناشی از ریخته-گری است. تخلخل نمونه ریختگی گردابی بدون ذرات تقویت



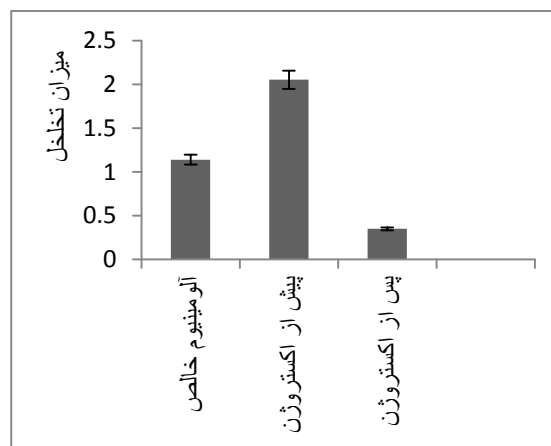
شکل (۳): دانه بندی قطعه ریختگی گردابی (الف): قبل از عملیات اکستروژن داغ و (ب): پس از عملیات اکستروژن داغ

می‌شود، اتصال ضعیف بین ذره و زمینه به جهت عدم ترشوندگی مناسب ذره به وسیله مذاب می‌باشد. در گزارشات و تحقیقات به عمل آمده مشاهده شد که عملیات اکستروژن باعث استحکام مناسب‌تر ذره و زمینه می‌شود. در تحلیل نیروهای اعمالی در عملیات اکستروژن، مشاهده می‌شود اگرچه در محل اتصال ذره و زمینه، تنش هیدروستاتیک کششی به عنوان نیروی محرکه جدا شدن ذره از زمینه محسوب می‌شود، اما به جهت بالا بودن تنش هیدروستاتیک فشاری حاصل از نیروی اکستروژن اعمالی بر نمونه، تنش کششی خنثی شده و همچنین استحکام ذره و زمینه به شدت بالا می‌رود [۱۶].

یکی دیگر از اثرات مطلوب عملیات اکستروژن بر قطعات کامپوزیتی ریختگی جهت‌گیری مناسب‌تر ذرات سرامیکی در زمینه فلزی علاوه بر پخش مناسب‌تر ذرات در زمینه می‌باشد. معمولاً اگر اکستروژن در دمای بالا انجام شود این اتفاق رخ می‌دهد، اما اگر اکستروژن در دمای پایین رخ دهد که در آن تنش سیلان زمینه فلزی بالا باشد و امکان رهاسازی نابعایی‌ها و بازیابی و تبلور مجدد زمینه به وجود نیاید، احتمال شکست ذرات بیشتر از همسو شدن آن‌هاست [۱۷].

مشکل دیگر در تولید کامپوزیت‌های روش ریخته‌گری گردابی، تجمع ذرات تقویت کننده به صورت آگلومراسیون می‌باشد. پس از عملیات اکستروژن داغ، ذرات آگلومره شده بر اثر اعمال تنش زیاد و به علت ترد بودن ذرات سرامیکی خرد، و در زمینه پخش می‌شوند که این موضوع باعث کاهش آگلومراسیون و اثرات مخرب آن بر استحکام و خواص نمونه کامپوزیتی می‌گردد [۱۳]. در شکل (۶) پخش بسیار مناسب عناصر تشکیل دهنده نمونه کامپوزیتی اکستروژن داغ شده به وسیله نقشه نقطه ای مشاهده می‌شود. به ترتیب از بالا به پایین، نقشه پخش ذرات کربن، آلومینیوم، بور و سیلیسیم در نمونه کامپوزیتی قابل مشاهده است.

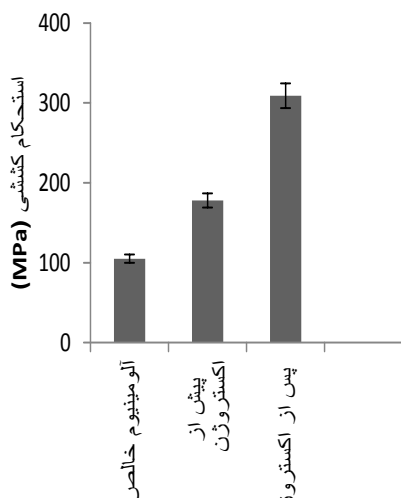
کننده برابر با ۱/۱۴ درصد می‌باشد که نشان دهنده افزایش میزان تخلخل با افزودن ذرات تقویت کننده است. مکانیزم عمل اکستروژن داغ برای حذف تخلخل‌ها بدین گونه است که با ایجاد تنش‌های برشی بسیار زیاد در زمینه فلزی باعث حرکت لایه‌های زمینه بر روی هم و حذف و پر شدن تخلخل‌ها می‌شود.



شکل (۵): درصد تخلخل نمونه‌ها.

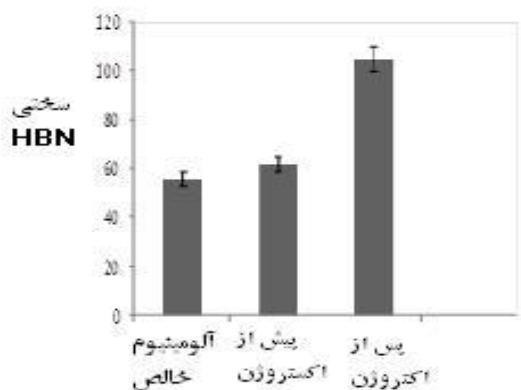
انجام عملیات اکستروژن در دمای بالا می‌تواند منجر به کاهش تخلخل، از طریق کاهش تنش سیلان و روان شدن سیلان زمینه آلومینیومی شود. هم چنین به جهت کاهش شکست ذرات سرامیکی، امکان به وجود آمدن ریز حفرات کاهش می‌یابد [۱۵]. علاوه بر این، افزایش نسبت اکستروژن به علت افزایش تنش فشاری بر نمونه، موجب کاهش میزان تخلخل می‌شود. از طرفی افزایش فشار باید با افزایش دمای عملیات همراه شود تا سیلان ماده افزایش یابد، در غیر این صورت با شکست ذرات سرامیکی، امکان ایجاد حفرات ریز در قطعه به وجود می‌آید. طبق بررسی‌های به عمل آمده افزایش دمای اکستروژن آلومینیوم به بیش از 400°C می‌تواند سبب ایجاد اصطکاک کاملاً چسبنده در سطح تماس قالب و قطعه گردد، و علاوه بر افزایش فشار اکستروژن، سبب افزایش دما در سطح نمونه و احتمال ایجاد عیوب متالورژیکی مثل پارگی داغ در سطح قطعه شود [۱۳]. یکی از مشکلاتی که در کامپوزیت‌های ریختگی مشاهده

۳۰۹MPa است که نسبت به نمونه کامپوزیتی قبل از عملیات اکستروژن داغ با استحکام ۱۷۸MPa، مقدار ۷۴ درصد و نسبت به قطعه آلومینیومی خالص ریختگی با استحکام ۱۰۵MPa، حدود دو برابر افزایش استحکام گزارش شده است (شکل (۷)).

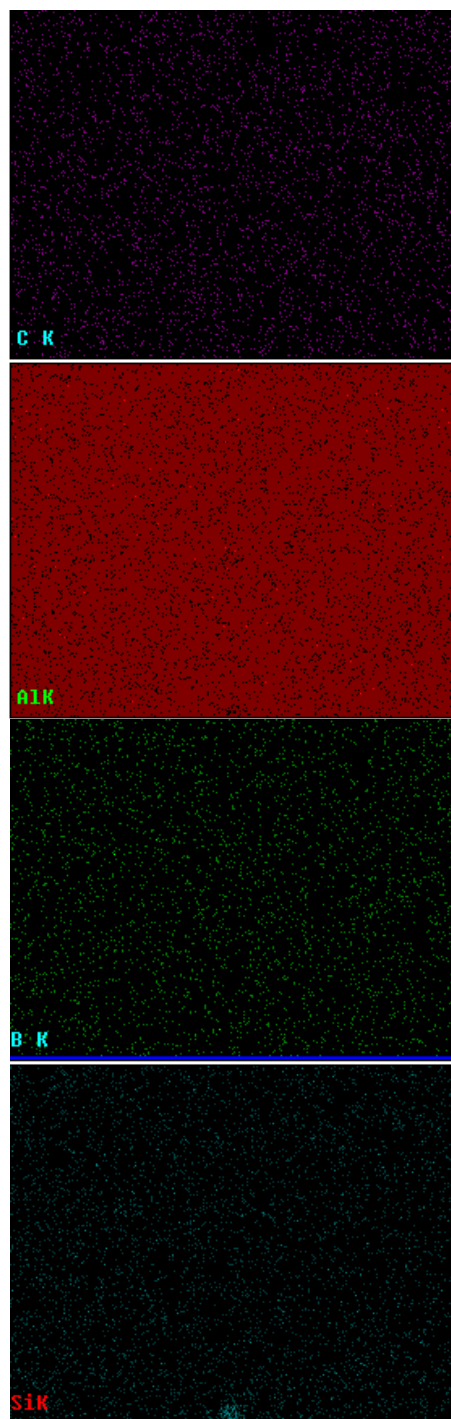


شکل (۷): استحکام کششی قطعات.

همچنین سختی قطعه کامپوزیتی پس از اکستروژن داغ از ۶۲HBN به ۱۰۵ HBN می‌رسد. قابل ذکر است که سختی نمونه آلومینیومی بدون ذرات تقویت ۵۶ HBN محاسبه شد. این مقادیر در شکل (۸) مشاهده می‌شود.



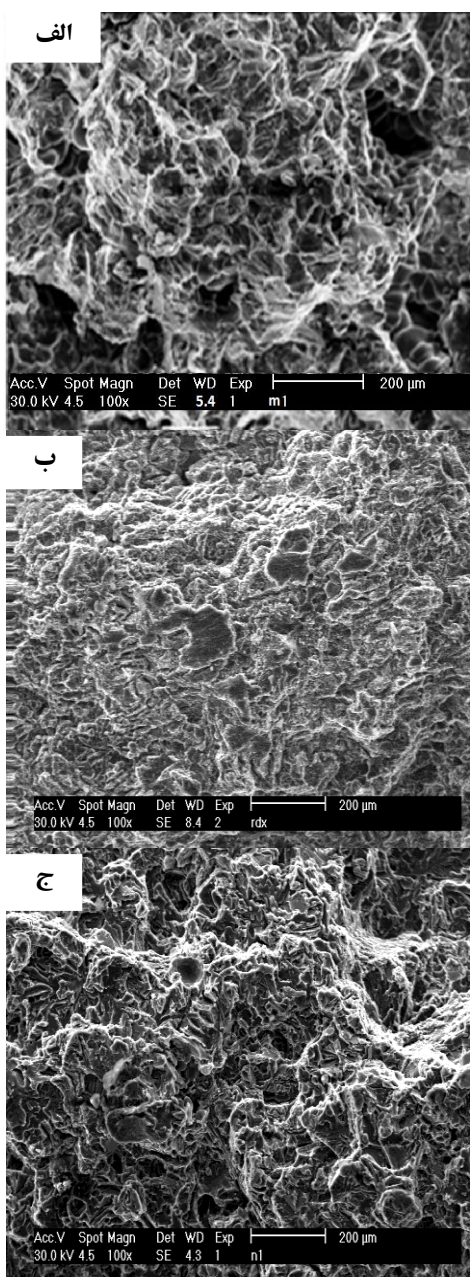
شکل (۸): سختی نمونه‌ها بر حسب برینل.



شکل (۶): نقشه نقطه‌ای نمونه تولید شده به وسیله ریخته‌گری گردابی پس از عملیات اکستروژن داغ.

یکی دیگر از اثرات انجام عملیات اکستروژن داغ بر نمونه، افزایش استحکام مکانیکی آن می‌باشد. در بررسی‌های به عمل آمده استحکام کششی قطعه کامپوزیتی اکستروژن شده برابر با

نمونه پیش از اکستروژن به دلیل وجود تخلخل‌ها دارای تورق است. این در حالیست که عملیات اکستروژن داغ باعث شده است سطوح شکست نمونه‌ها به جهت کاهش چشمگیر تخلخل‌ها بسیار به سمت شکست نرم‌تر حرکت کرده است و به وضوح از تعداد صفحات تورق کاسته شده و افزایش میزان اشکال رودخانه ای و دیمپل‌ها قابل مشاهده است (شکل ۹ الف)).



شکل (۹): (الف): تصاویر سطح شکست نمونه شاهد، نمونه ریختگی گردابی (ب): قبل از عملیات اکستروژن داغ و (ج): پس از عملیات اکستروژن داغ

علت افزایش استحکام و سختی نمونه‌ها در اثر عملیات اکستروژن داغ، کوچک شدن دانه‌ها، کاهش تخلخل در نمونه‌ها، بهبود اتصال در تقویت کننده‌ها و زمینه آلومینیومی و خرد شدن آگلومره‌ها می‌باشد که در قسمت ۳-۱ بطور کامل بیان شد.

۲-۳- بررسی سطوح شکست کامپوزیت‌ها

در شکل (۹) تصاویر توپوگرافی سطح شکست قطعه ریختگی گردابی قبل و بعد از عملیات اکستروژن داغ مشاهده می‌شود. این تصاویر به وسیله استفاده از الکترون‌های ثانویه و به منظور بررسی نوع شکست نمونه‌ها تهیه شده‌اند. هم چنین سطح شکست نمونه شاهد که نمونه آلومینیوم ۳۵۶ بدون ذرات تقویت کننده است، در شکل (۹ الف) مشاهده می‌شود.

اساساً در بررسی نحوه شکست قطعات کامپوزیتی سه نوع مکانیزم معرفی می‌شود. اولین مکانیزم، جوانه‌زنی ترک بر روی ذرات تقویت کننده و سپس رشد آن است. در حالت دیگر، ترک در فصل مشترک زمینه و تقویت کننده شکل می‌گیرد و رشد می‌کند. در حالت سوم نیز این امکان وجود دارد که ترک در زمینه ایجاد شود و سپس رشد کند.

با مشاهده سطح شکست نرم مشخص می‌شود که ترک بر روی ذرات تقویت کننده ایجاد شده و به همین دلیل در بررسی سطح شکست، باقی مانده ذرات فاز تقویت کننده قابل مشاهده است. وجود حفره (دیمپل) و خطوط رودخانه ای از ویژگی‌های سطوح شکست نرم است. اما در شکست ترد، شکست به صورت ناگهانی و عدم وجود پدیده گلویی شدن^۷ رخ می‌دهد که این موضوع باعث ایجاد سطح شکست نسبتاً صاف و دارای تورق می‌شود. معمولاً در این نوع شکست ترک از محل تخلخل‌ها رشد می‌کند. بنابراین افزایش تخلخل باعث افزایش تمایل به شکست ترد در کامپوزیت‌ها می‌گردد [۱۸-۲۱].

در شکل (۹ الف) وجود تعداد زیاد حفره (دیمپل) و خطوط رودخانه ای نشان دهنده نرم بودن نوع شکست نمونه‌ها می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۹ الف) مشاهده می‌شود، سطح شکست

۳- نتیجه گیری

انجام عملیات اکستروژن داغ بر نمونه های کامپوزیتی تولید شده به روش ریخته گری گردابی اثر بسیار زیادی بر خواص و ریز ساختار این نمونه ها دارد به عنوان مثال بیشینه استحکام کششی نمونه کامپوزیتی ریخته گری گردابی با ۷۴ درصد رشد، از ۱۷۸ MPa به ۳۰۹ MPa افزایش یافته است و نوع شکست نمونه های ریخته گری گردابی بیشتر به نوع شکست نرم نزدیک می شود. هم چنین عملیات اکستروژن داغ باعث شد، تخلخل نمونه های ریخته گری گردابی از ۲/۰۵۲ درصد به ۰/۳۵ درصد کاهش یابد.

۴- مراجع

- [1] چاولا، "کامپوزیت های زمینه فلزی"، ترجمه دکتر محمود مرآتیان، انتشارات دانشگاه اصفهان.
- [2] D.B. Miracle, S.L. Donaldson, "ASM Hand book", Composites, ASM International, Materials park, OH, USA, Vol. 21, 2001.
- [3] J. Hashim, L. Looney & M.S.J. Hashmi, "Metal matrix composites: production by the stir casting method", School of Mechanical and Manufacturing Engineering, Dublin City University, Vol 9, Ireland.
- [4] G. D. With, "Note on the Temperature Dependence of Hardness of Boron Carbide", J. Less Common Met, Vol. 95, PP. 133-8, 1983.
- [5] B. V. S. subbaRao et al, "Synthesis of High Purity Boron Carbide Powder", Ceramic Powders for High-tech Applications, John Wiley and sons Pub. U. S, 2004.
- [6] F. Therenot, "Boron Carbide-A Comprehensive Review", J. Euro. Ceram. Vol. 6, PP. 205-225, 1990.
- [7] Maleki, "Effects of squeeze casting parameters on the microstructure of LM13 alloy", materials processing technology, Vol. 209, PP. 3790-3797, 2009.
- [8] امیر پاکدل، مسعود امامی، "بررسی تأثیر فرآیند اکستروژن بر ریزساختار و استحکام کامپوزیت Al6061-SiC"، نشریه دانشکده فنی، دوره ۴۳، شماره ۲، از صفحه ۱۵۹ تا ۱۸۱، تیرماه ۱۳۸۸.
- [9] H. Soon, A. Hong, H. Kyung & Chung, "Effects of hot extrusion parameters on the tensile properties and microstructures of SiCw-2124Al composites", Materials Science and Engineering, Vol. A 206, PP. 225-232, 1996.
- [10] C.G. Kanga, Y.J. Jungb & H.C. Kwonc, "Finite element simulation of die design for hot extrusion process of Al/Cu clad composite and its experimental investigation", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 124, PP. 49-56, 2002.
- [11] American Society for Testing Materials, "Standard Test Method of Tension Testing Wrought and Cast Aluminum and Magnesium Alloy products - B557", Handbook of ASTM Standards, Vol. 3, pp. 91, 1994.
- [12] Cyrus Liua, S.M. Jeng, J.-M. Yang & R.A. Amato, "Processing and high temperature deformation of metal-matrix composites", Materials Science and Engineering, Vol. A 191, PP. 49-59, 1995.
- [13] Dieter G, "Mechanical metallurgy", McGraw Hill, Third Edition, 1976.
- [14] G. Liu, J. Zhou & J. Duszczuk, "Prediction and verification of temperature evolution as a function of ram speed during the extrusion of AZ31 alloy into a rectangular section", Journal of Materials Processing Technology, PP. 191-199, 2007.
- [15] Y.H. Seo, C.G. Kang, "Effects of hot extrusion through a curved die on the mechanical properties of SiCp/Al composites fabricated by melt-stirring", Composites Science and Technology, Vol. 59, 643-654, 1999.
- [16] N. H. Kim, C. G. Kang, & B. M. Kim, "Die design optimization for axisymmetric hot extrusion of metal matrix composites." International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 43. PP. 1507-1520, 2001.
- [17] L. M. Tham, M. Gupta, & L. Cheng, "Effect of reinforcement volume fraction on the evolution of reinforcement size during the extrusion of Al-SiC composites." Materials Science and Engineering A, Vol. 326, PP. 355-363, 2002.
- [18] B.Y. Zong, B.J. Derby, "Comparison of the plastic deformation and failure of A359/SiC and 6061-T6/Al2O3 metal matrix composites under dynamic tension", J. Mater. Vol. 31, pp. 297, 1996.

- [19] G.C. Syu, A.K., "The effect of temperature on the fracture mechanism in 2014Al/15vol. %Al₂O₃ composite", Mater. Sci. Eng, Vol. 184, pp. 27, 1994.
- [20] T. Christman, A. Needleman, S. Nutt, S. Suresh, "Effect of fibre debonding in a whisker-reinforced metal", Mater. Sci. Eng, Vol. 107, pp. 49, 1989.
- [21] L. Yulong, K.T. Ramesha, "The infiltration of B-SiC in porous Alumina compacts in a microwave field", Materials Science and Engineering, Vol. 33, pp. 5-12, 2005.

۵- پی نوشت

- [1] Infiltration
[2] Squeeze cast
[3] Spray co-deposition
[4] Insitu
[5] Agglomeration
[6] Etching
[7] Necking