



بررسی سختی و رفتار فشاری نانوکامپوزیت آلومینیوم/الیاف کوتاه شیشه تولید شده به روش آسیاب گلوله‌ای و پرس گرم

علی شکوه‌فر^{۱*}، امین عظیمی^۲، اشکان ذوالریاستین^۳، علی اصغر جعفری^۴

۱- استاد مهندسی مواد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
۳- دانشجوی دکتری مهندسی مواد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
۴- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
* تهران، صندوق پستی ۱۹۳۹۵۱۹۹۹، shokuhfar@kntu.ac.ir

چکیده - آلیاژ نانوساختار آلومینیوم بوسیله دو مکانیزم هم‌زمان شکست و جوش سرد آلیاژسازی مکانیکی بر روی پودرهای عناصر تشکیل‌دهنده، تولید شد و از این آلیاژ نانوساختار به عنوان زمینه برای نانوکامپوزیت آلومینیوم/الیاف کوتاه شیشه استفاده شد. پودر نانوکامپوزیت تحت فشار ۴۰۰ مگاپاسکال و در دمای ۳۸۰ درجه سانتی‌گراد فشرده‌سازی گردید. چگالی نسبی و خواص مکانیکی این نانوکامپوزیت در درصدهای وزنی ۱، ۳ و ۵ از الیاف کوتاه شیشه بررسی شد. چگالی نسبی بدلیل افزایش شدید تخلخل‌ها در فصل مشترک فاز زمینه و تقویت‌کننده در نمونه با ۵ درصد بسیار کمتر از نمونه ۱ و ۳ درصد شد. خواص مکانیکی از نمونه ۱ به ۳ درصد افزایش ولی در ۵ درصد با کاهش شدید چگالی، کاهش یافت. همچنین مقایسه نانوکامپوزیت با زمینه‌های آلومینیوم آلیاژی و خالص نشان‌دهنده تقویت‌کنندگی بیشتر در نمونه با زمینه آلومینیوم خالص می‌باشد. **کلیدواژگان:** نانوکامپوزیت زمینه آلومینیومی، خواص مکانیکی، آسیاب‌کاری گلوله‌ای، پرس گرم، الیاف شیشه.

Investigation of hardness and compression behavior of Al/Short glass_f nanocomposite produced by ball milling and hot pressing

A. Shokuhfar^{1*}, A. Azimi², A. Zolriasatein³, A.A. Jafari⁴

1- Prof., Materials Eng., Faculty of Mech. Eng., K. N. Toosi Univ. of Tech., Tehran, Iran
2- Msc Student, Mech. Eng., Faculty of Mech. Eng. g, K. N. Toosi Univ. of Tech., Tehran, Iran
3- PhD Candidate, Materials Eng., Faculty of Mech. Eng., K. N. Toosi Univ. of Tech., Tehran, Iran
4- Assoc. Prof., Mech. Eng., Faculty of Mech. Eng., K. N. Toosi Univ. of Tech., Tehran, Iran
*P. O. B. 19395-1999 Tehran, shokuhfar@kntu.ac.ir

Abstract- Nanostructured aluminum alloy was synthesized by simultaneous fracture and cold welding mechanisms in mechanical alloying with elemental powders and this alloy was applied as matrix to fabricate Al/Short glass fiber nanocomposite in 1, 3 and 5 percent of glass fibers. The resulting powders were consolidated under 400 MPa at 380 °C to produce consolidated nanocomposites. Relative density of samples reduced with increasing the percentage of glass fibers and this trend was more intense from 3 to 5 percent. Mechanical properties were enhanced with increasing glass fiber but decrease of mechanical properties was observed in 5 percent due to reducing in relative density. Compressive strength was compared between nanocomposite with pure Al and Al alloy matrix, and results show more reinforcement in Al based sample.

Keywords: Aluminum Based Nanocomposite, Mechanical Properties.

۱- مقدمه

نشان داده است که با نانوساختارشدن این آلیاژ، استحکام و سختی آن بقدر قابل توجهی افزایش خواهد یافت. بر اساس تئوری هال-پتچ^۲ کاهش اندازه دانه تا ابعاد نانومتری باعث افزایش استحکام و سختی مواد کریستالی خواهد شد. با افزایش شدید مرزخانه‌ها در فلزات نانوکریستالی حرکت نابجایی‌ها محدودتر شده، بدین ترتیب استحکام افزایش می‌یابد. در فلزات با اندازه دانه بزرگتر فرصت برای تجمع نابجایی‌ها درون دانه وجود داشته، علاوه بر این انرژی کمتری برای حرکت نابجایی درون دانه مورد نیاز می‌باشد بنابراین استحکام با افزایش اندازه دانه‌ها کاهش می‌یابد [۱].

همچنین افزودن مواد سرامیکی به عنوان تقویت‌کننده برای تولید نانوکامپوزیت، موجب بهبود خواص مکانیکی آلیاژ زمینه شده است. تقویت‌کننده‌های سخت سرامیکی به عنوان مانعی در مسیر حرکت نابجایی‌ها عمل کرده و استحکام زمینه را افزایش می‌دهد [۸].

برای رسیدن به قطعه بالک، لازم است پودر فلزی تولید شده به روش آسیاب‌کاری مکانیکی بصورت تک‌جزئی یا چند جزئی (کامپوزیت) با مشخصات ریزساختاری و فازی مورد نظر، فشرده‌سازی^۳ شود. یکی از روش‌هایی که اخیراً برای فشرده سازی پودرها بکار گرفته شده، روش پرس گرم^۴ می‌باشد. در این روش فشار و دما بطور همزمان بر روی پودرها اعمال می‌شود. عامل فشار باعث تغییر شکل و حذف حفره‌های بین پودرها شده و با افزایش سطح تماس بین ذرات پودر، شرایط را برای اتصال و تفجوشی^۵ آسان‌تر می‌کند. در حقیقت سطوح بیشتری برای اتصال بین اتمی ایجاد می‌شود. بدین ترتیب تفجوشی در حضور فشار با تخلخل کمتر و زمان کوتاه‌تر صورت می‌گیرد. میزان فشار و دمای فرایند فشرده‌سازی تأثیر مستقیم بر مقدار تخلخل‌ها و چگالی نمونه داشته، بطوری که با افزایش فشار و دمای فرایند، تخلخل‌ها کمتر و چگالی نمونه بیشتر می‌شود. البته مطالعات اخیر نشان داده است که افزایش این عوامل از یک مقدار ثابتی بیشتر تأثیر چندانی در بهبود چگالی نمونه ندارد [۹، ۱۰].

پیش از این، بررسی رفتار میرایی^۶ کامپوزیت آلومینیوم/

باوجود کارایی مطلوب فناوری کامپوزیت در تهیه مواد با خواص مطلوب، در اغلب موارد مواد کامپوزیتی پاسخ‌گوی نیازهای صنعتی نبوده است. در سال‌های اخیر، پژوهشگران دریافته‌اند که چنانچه بتوان مواد را در مقیاس‌های کوچک‌تر تهیه کرد، پیوندهایی که ماده با ابعاد کوچک با فازهای اطراف خود برقرار می‌کند، به مراتب قوی‌تر از مقیاس‌های بزرگتر است. بر این اساس شاخه جدیدی از کامپوزیت‌ها به نام نانوکامپوزیت‌ها، ارائه و توسعه یافت [۱]. نانوکامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی به دلیل خواص عالی نظیر استحکام و سختی بالا و چگالی پایین توجه زیادی در صنایع فضایی و خودرو به خود جلب کرده است [۲]. یکی از جدیدترین روش‌های تولید نانوکامپوزیت‌ها، آلیاژسازی مکانیکی^۱ است. آلیاژسازی مکانیکی فرایند حالت جامدی است که در آن مخلوط پودری شکل در یک آسیاب (در اتمسفر خنثی) در معرض برخوردهای پراثرژی گلوله‌ای قرار می‌گیرد. در حین انجام این فرایند تغییر فرم پلاستیک شدیدی در ذرات پودر ایجاد شده و کریستال‌ها به شدت تحت کرنش قرار می‌گیرند و در نتیجه اندازه دانه‌ها کاهش می‌یابد. بنابراین فرایند آلیاژسازی مکانیکی با دو پدیده مهم جوش خوردن و شکست مکرر ذرات پودر همراه است. افزایش سطح ذرات و بالا رفتن دمای موضعی باعث تشدید پدیده نفوذ اتمی شده و آلیاژسازی صورت می‌گیرد. ولی به دلیل تکرار مکانیزم‌های شکست و جوش سرد، کارسختی ذرات افزایش یافته و مکانیزم شکست غالب می‌شود. زمانی فرایند آلیاژسازی مکانیکی به اتمام می‌رسد که سرعت جوش خوردن ذرات با سرعت شکستن آنها برابر شود که در نتیجه، اندازه متوسط ذرات به یک حد ثابتی می‌رسد [۳-۵]. اخیراً محققان دریافته‌اند که کوچک شدن اندازه دانه‌ها تا ابعاد نانومتری و در نتیجه افزایش اتم‌ها در مرزخانه‌ها، انرژی ذخیره شده در این نواحی به عنوان نیروی محرکه‌ای برای آلیاژشدن عمل می‌کند [۶].

آلیاژهای آلومینیومی سری ۷ (آلومینیوم-روی) به دلیل استحکام بالا و قابلیت عملیات حرارتی این آلیاژها، دارای کاربردهای گسترده‌ای در صنایع مختلف از جمله صنایع دفاعی و هوایی می‌باشند. تولید این آلیاژ به روش آلیاژسازی مکانیکی، نانوساختارشدن آلیاژ را نیز همراه خواهد داشت [۷]. مطالعات

1. Mechanical Alloying

2. Hall-Petch
3. Consolidation
4. Hot Pressing
5. Sintering
6. Damping

کنترل‌کننده فرایند استفاده گردید.

جدول ۱ مشخصات پودرهای اولیه

Al	Zn	Mg	عنصر آلیاژی
۴۰-۶۳	۱۰-۲۰	۴۰-۶۳	اندازه ذرات (μm)
۹۹/۹	۹۹/۹۸	۹۹/۹۸	خلوص (%)

برای تولید نمونه بالک، پودرهای آلیاژ شده در قالب استوانه‌ای به قطر ۱۰ میلی‌متر با فشار ۴۰۰ مگاپاسکال و در دمای ۳۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه تحت فرایند پرس گرم، فشرده‌سازی شد. در فرایند فشرده‌سازی از دستگاه پرس هیدرولیک تک‌محوره با ظرفیت ۴۰ تن استفاده شد. از درصدهای وزنی ۱، ۳ و ۵ الیاف کوتاه شیشه از نوع ای-گلس^۷ با قطر بین ۵ تا ۱۰ میکرومتر و طول ۳ میلی‌متر از مراحل اولیه در آسیاب استفاده گردید و در شرایط یکسان با آلیاژ، تحت پرس گرم قرار گرفت. نمونه‌ها بصورت استوانه‌ای شکل با طول ۱۵ میلی‌متر و قطر ۱۰ میلی‌متر تولید شد. آزمون پراش اشعه ایکس^۸ با طول موج ۰/۱۵۴۰۶ بر روی نمونه‌های بالک صورت گرفت. اندازه دانه‌های آلومینیوم در نمونه‌ها با استفاده از قانون ویلیامسون-هال^۹ در پراش‌های آلومینیوم محاسبه شد [۱۷]. ریزساختار نانوکامپوزیت در درصدهای مختلف از الیاف شیشه و فصل مشترک بین فاز زمینه و تقویت‌کننده، توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی، مشخصه‌یابی شد. چگالی ارشمیدسی نمونه‌های نانوکامپوزیتی با ۰، ۱، ۳ و ۵ درصد وزنی طبق استاندارد ASTM B311 با استفاده از ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم اندازه‌گیری شد و نسبت چگالی ارشمیدسی به چگالی تئوری به عنوان چگالی نسبی محاسبه شد. سختی برینل میانگین ۵ نقطه در مقطع عرضی نمونه در بار ۳۰ کیلوگرم نیرو و ساچمه با قطر ۲/۵ میلی‌متر طبق استاندارد ASTM E10-12 توسط دستگاه یونیورسال مدل (یو وی) ۱^{۱۰} گزارش شده است. همچنین منحنی تنش-کرنش فشاری نمونه‌ها در دمای اتاق و نرخ کرنش ۱ میلی‌متر بر دقیقه توسط دستگاه سنتام مدل STM-150 با ظرفیت ۱۵ تن، در آزمون فشار مطابق استاندارد ASTM E9-89a به دست آمد.

7. E-Glass
8. XRD
9. Williamson-Hall
10. UV1

الیاف شیشه نشان داده که با افزایش الیاف شیشه ظرفیت میرایی ارتعاشات افزایش می‌یابد [۱۱]. همچنین مطالعاتی در خواص مکانیکی زمینه نانوکامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی با تقویت‌کنندگی ذرات و الیاف کوتاه سرامیکی نظیر آلومینا^۱ و سیلیسیم کاربید^۲ انجام شده است. استحکام بالای ذرات و الیاف تقویت‌کننده و همچنین وجود اختلاف ضریب انبساط حرارتی بین زمینه آلومینیومی و تقویت‌کننده‌های سرامیکی موجب افزایش تجمع نابجایی‌ها در اطراف فاز تقویت‌کننده شده و در نتیجه باعث افزایش استحکام زمینه خواهد شد [۱۲-۱۶]. بطوریکه افزودن ۵ درصد حجمی ذرات آلومینا در زمینه آلیاژ آلومینیوم-روی موجب افزایش ۲۵ درصدی سختی زمینه شده است [۱۳]. همچنین استفاده از ۱۰ درصد حجمی الیاف کوتاه آلومینا در زمینه آلومینیوم-۵/۵ درصد منیزیم، حدود ۱۰۰ مگاپاسکال استحکام نهایی کششی زمینه را افزایش داده است [۱۶].

افزودن الیاف سرامیکی شیشه به آلیاژ آلومینیومی و آلومینیوم خالص هنگام آسیاب‌کاری به منظور تولید نانوکامپوزیت و بهبود خواص مکانیکی نظیر سختی^۳ و استحکام فشاری^۴ آلیاژ، هدف اصلی این پژوهش می‌باشد. همچنین تأثیر تأثیر درصدهای مختلفی از الیاف شیشه بکار رفته، در چگالی نمونه بالک و خواص مکانیکی مورد بررسی قرار گرفت.

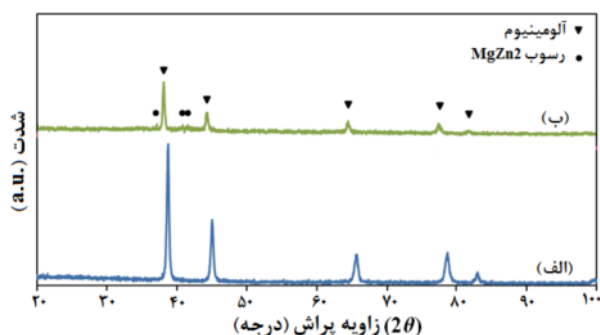
۲- روش آزمایش

مخلوط پودرهای آلومینیوم و روی و منیزیم به منظور ساخت آلیاژ نانوساختار (آلومینیوم، ۸ درصد وزنی روی و ۳ درصد وزنی منیزیم) استفاده شد. مشخصات ذرات اولیه (خلوص و اندازه ذرات) در جدول ۱ خلاصه شده است. فرایند آلیاژسازی مکانیکی در آسیاب سیاره‌ای مدل فریتچ (پی) ۵^۵ تحت گاز آرگون بوسیله گلوله‌های فولادی زنگ نزن با قطر ۱۰ میلی‌متر انجام شد. از نسبت وزنی گلوله به پودر ۱:۱۵ و سرعت ۲۵۰ دور بر دقیقه در این فرایند برای آلیاژسازی استفاده شد. همچنین از ۰/۵ درصد وزنی اسید استئاریک^۶ به عنوان عامل

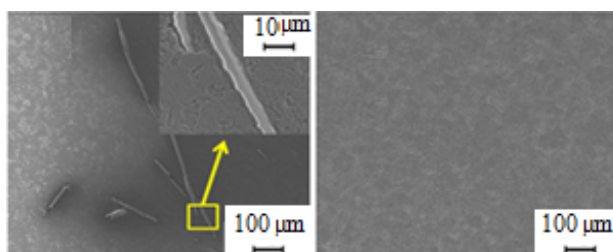
1. Al2O3
2. SiC
3. Hardness
4. Compressive strength
5. Fritsch p6
6. Stearic acid

شکل ۳ نشان‌دهنده تصویر میکروسکوپ الکترونی از زمینه آلومینیومی خالص و تقویت‌شده با الیاف شیشه می‌باشد. همچنین کیفیت فصل مشترک دو فاز این ماده مرکب، با بزرگنمایی بیشتر نشان داده شده است. زمینه آلومینیومی به دلیل کارسختی کمتری که در فرایند آسیاب‌کاری بر روی ذرات آنها اتفاق افتاده است، انعطاف‌پذیری بیشتری نسبت به آلومینیوم آلیاژی دارد، در نتیجه در حین پرس چسبندگی بیشتری در فصل مشترک زمینه و الیاف ایجاد شد.

نانوکامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی آلیاژی با ۱، ۳ و ۵ درصد الیاف شیشه و همچنین فصل مشترک بین دو فاز زمینه و تقویت‌کننده در شکل ۴ نمایان است. فرایند پرس گرم بر روی پودرهای آلیاژی باعث جدا شدن رسوبات پراکنده ($MgZn_2$) در ابعاد ۵۰ تا ۴۰۰ نانومتر در زمینه آلیاژی شده و همچنین این رسوبات پراکندگی مناسبی در زمینه داشته است. تشکیل این رسوبات و پراکندگی مناسب آنها در زمینه تأثیر زیادی در بهبود استحکام آلیاژ دارد. تصویر فصل مشترک در نانوکامپوزیت ۱ درصد چسبندگی نسبتاً خوبی بین دو فاز را نشان می‌دهد.



شکل ۲ نمودار الگوی پراش اشعه ایکس (الف) آلومینیوم و (ب) آلومینیوم آلیاژی، بالک نانوساختار



الف - ۰ درصد وزنی الیاف ب - ۱ درصد وزنی الیاف

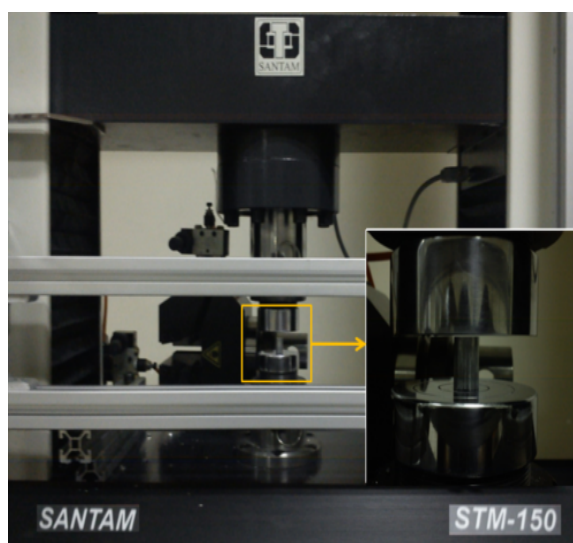
شکل ۳ تصویر SEM نانوکامپوزیت آلومینیوم خالص

بطوری که برای هر نمونه نانوکامپوزیت با درصد مشخص از الیاف شیشه، ۳ آزمایش فشار انجام شد و نتایج میانگین این آزمایش‌ها گزارش شده است. شکل ۱ نمایی از دستگاه آزمون فشار را هنگام بارگذاری روی نمونه نشان می‌دهد.

۳- بحث و نتایج

۳-۱- ریزساختار نمونه‌ها

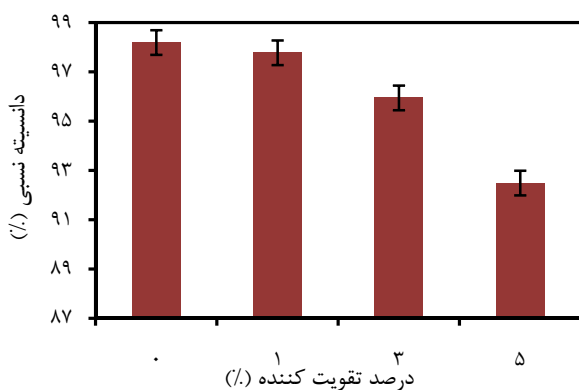
شکل ۲ نمودار الگوی پراش اشعه ایکس آلیاژ آلومینیومی (آلومینیوم-روی-منیزیم) و آلومینیوم خالص در حالت فشرده شده را نشان می‌دهد. محور عمودی این نمودار، میزان شدت اشعه ایکس بازتابش شده از صفحات کریستالی مشخص هر فاز می‌باشد که توسط شمارشگر دستگاه آنالیز پراش اشعه ایکس مشاهده شده و واحد آن، میزان شمارش پرتوهای ایکس با طول موج و انرژی یکسان بازتابش شده، است. همچنین زاویه پراش اشعه ایکس در محور افقی این نمودار مشاهده می‌شود. در نمودار آلومینیومی آلیاژی تنها پراش آلومینیوم تشخیص داده شد که تک فاز بودن ماده و انحلال کامل عناصر آلیاژی را در آلومینیوم نشان می‌دهد. علاوه بر آن حرکت پراش‌های آلومینیوم در آلیاژ نسبت به آلومینیوم خالص به سمت زاویه کمتر، دلیلی دیگر بر آلیاژسازی آلومینیوم در این نمودار است [۱۸]. با استفاده از قانون ویلیامسون-هال، اندازه دانه‌ها در زمینه آلیاژی ۴۰ نانومتر و زمینه آلومینیومی خالص ۶۴ نانومتر است. این اختلاف در اندازه دانه‌ها نشان می‌دهد که رسوبات و اتم‌های آلیاژی مانع رشد دانه‌ها در طول فرایند پرس گرم می‌باشند.



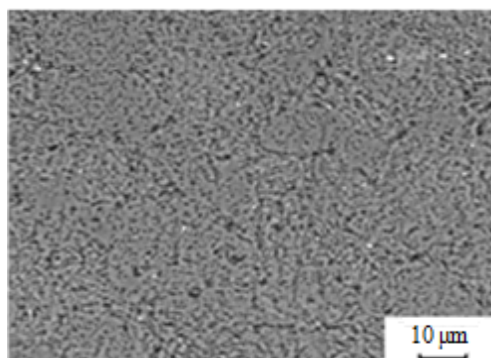
شکل ۱ تصویر دستگاه آزمون فشار

تقویت‌کننده منجر به بهبود خواص مکانیکی می‌شود [۸]. یکی از نکات قابل توجه در این تصاویر، نزدیک شدن الیاف شیشه در نمونه با ۳ درصد تقویت‌کننده می‌باشد. این تراکم الیاف باعث کاهش مقدار ماتریس بین الیاف شده و زمینه در این نواحی دارای ضخامت کمتری است و در نتیجه مقدار حجمی تخلخل‌ها در بین الیاف افزایش یافته و در بعضی از مناطق نقاط تمرکز تنش ایجاد شده که کاهش استحکام را به همراه دارد. این عامل مخرب در نانوکامپوزیت ۵ درصد بسیار شدیدتر است، بطوری که انباشتگی الیاف در یک نقطه خاص مشاهده می‌شود. این انباشتگی در یک ناحیه مشخص، باعث بوجود آمدن تخلخل‌ها گردیده و همچنین مرزی بین بعضی الیاف با ماتریس وجود ندارد. بطور کلی افزایش میزان الیاف سبب انباشتگی بیشتر شده، که بر اساس این موضوع انتظار می‌رود استحکام نانوکامپوزیت ۳ درصد نسبت به ۵ درصد کاهش یابد.

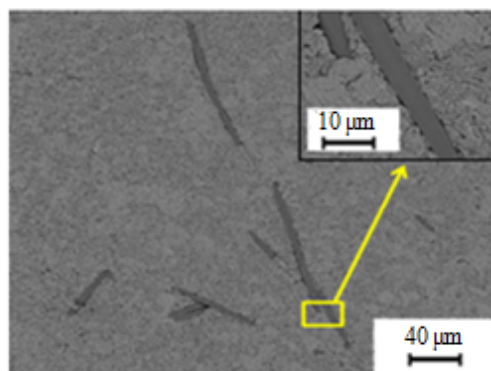
چگالی نسبی نمونه‌های نانوکامپوزیتی و آلیاژ زمینه در شکل ۵ مشاهده می‌شود. با افزایش درصد تقویت‌کننده میزان چگالی نسبی کاهش یافته که این موضوع بیانگر افزایش حجمی تخلخل‌ها در فصل مشترک زمینه و تقویت‌کننده در درصدهای بالاتر الیاف شیشه می‌باشد. از سوی دیگر، روند کاهش چگالی نسبی در ۵ درصد نسبت به ۳ درصد بسیار شدیدتر شده، که این کاهش به دلیل انباشتگی اشاره شده در تصویر میکروسکوپ الکترونی نمونه ۵ درصد می‌باشد. این روند کاهش در افزودن بیشتر از ۳ درصد وزنی نانوذرات آلومینا در آلومینیوم نیز در مطالعه تابنده خورشید و همکارانش [۱۹] مشاهده می‌گردد. بطوری که چگالی نسبی در نمونه با ۳ درصد آلومینا تقریباً برابر ۹۷/۵ درصد و در نمونه ۵ درصد به ۹۶/۲ درصد کاهش یافته است [۱۹].



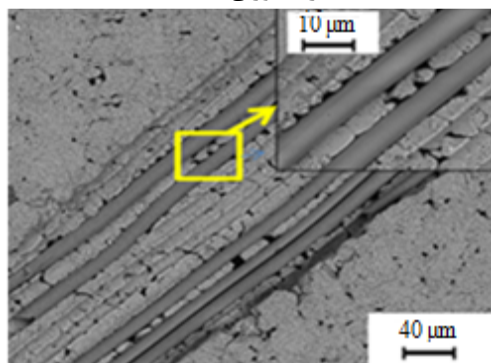
شکل ۵ چگالی نسبی نانوکامپوزیت با زمینه آلومینیوم آلیاژی



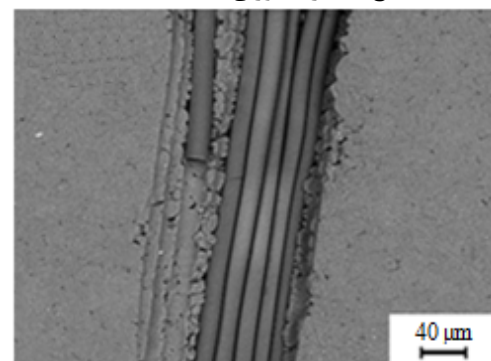
الف- ۰ درصد وزنی الیاف شیشه



ب- ۱ درصد وزنی الیاف شیشه



ج- ۳ درصد وزنی الیاف شیشه



د- ۵ درصد وزنی الیاف شیشه

شکل ۴ تصویر SEM نانوکامپوزیت آلومینیوم آلیاژی

تأثیر فصل مشترک با چسبندگی بالا در انتقال نیرو به

۳-۲- خواص مکانیکی

با افزودن ۳ درصد وزنی ذرات آلومینا [۱۹] مشاهده می‌شود، بطوری که افزایش چشمگیر سختی در آلومینیوم را می‌توان به چسبندگی بهتر ذرات به آلومینیوم خالص نسبت داد. همچنین افزایش بیشتر از حدود ۴/۵ درصد وزنی از این تقویت‌کننده در آلومینیوم، منجر به کاهش سختی می‌شود [۱۹]. چنین رفتاری را در نتایج سختی نمونه‌های نانوکامپوزیت این پژوهش نیز مشاهده شده است. بطوری که با افزایش بیشتر از ۳ درصد الیاف شیشه سختی نانوکامپوزیت دچار افت می‌شود.

منحنی تنش-کرنش حقیقی در تنش فشاری نمونه‌های پرس‌گرم شده در شکل ۷ نشان داده شده است. افزایش استحکام فشاری نمونه‌های نانوکامپوزیتی نسبت به آلیاژ تقویت‌نشده به عنوان تأثیر افزودن الیاف مشاهده می‌شود. با توجه به انعطاف‌پذیری بالای آلومینیوم خالص، افزایش کارسختی ذرات پودر آلیاژ زمینه در آسیاب گلوله‌ای هنگام نانساختار شدن و تشکیل رسوبات سخت پراکنده در زمینه در حین فشرده‌سازی، موجب کاهش انعطاف‌پذیری و تردی بیشتر نسبت به آلومینیوم خالص شده است.

در نانوکامپوزیت‌ها با افزایش درصد تقویت‌کننده، فاصله بین الیاف موجود در زمینه کاهش یافته و حرکت نابجایی‌ها محدودتر و موانع موجود در مسیر حرکت آنها بیشتر شده، در نتیجه این موضوع باعث کاهش کرنش نهایی و انعطاف‌پذیری شده است. علاوه بر این، با افزایش درصد تقویت‌کننده انرژی بیشتری برای عبور نابجایی‌ها و ادامه حرکت آنها لازم است، در نتیجه استحکام فشاری نمونه افزایش یافته است. همچنین کاهش انعطاف‌پذیری با افزایش مقدار تقویت‌کننده را می‌توان به افزایش تخلخل‌ها در نمونه نسبت داد.

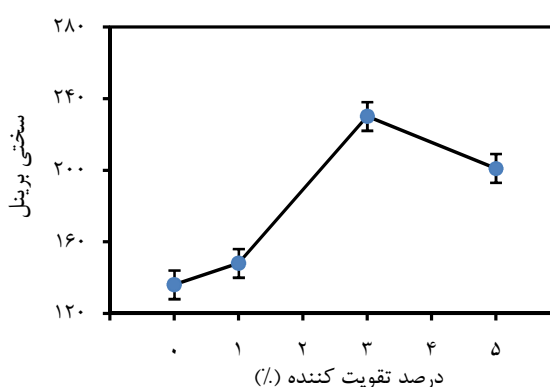
نکته قابل تامل منحنی‌های فشاری، کاهش استحکام و کرنش نهایی در نمونه ۵ درصد نسبت به ۳ درصد است. این موضوع بیانگر این نکته می‌باشد که نه تنها الیاف باعث بهبود خواص مکانیکی نشده است، بلکه باعث افت استحکام فشاری در کرنش نهایی کمتر را می‌شود. این پدیده، نتیجه ریزساختار متخلخل و انباشتگی الیاف در نمونه با افزایش درصد تقویت‌کننده است. مدول یانگ، پارامتر دیگر متأثر از تقویت‌کنندگی الیاف می‌باشد. اگرچه با افزایش درصد وزنی الیاف، استحکام فشاری نمونه‌ها در ابتدا افزایش و در درصدهای بالاتر کاهش می‌یابد، ولی مدول یانگ فشاری تنها روند افزایشی دارد. از

خواص مکانیکی نظیر سختی، استحکام و مدول یانگ در حالت فشاری نانوکامپوزیت تولید شده و آلیاژ زمینه در جدول ۲ خلاصه شده است. علاوه بر این، استحکام تسلیم نمونه‌ها نیز در حالت فشاری گزارش شده است. همچنین به دلیل این که برهم‌کنش الیاف و زمینه در کنار یکدیگر و بطور هم‌زمان ارزیابی گردد، آزمون سختی برینل بر روی نمونه‌ها انجام گرفت.

شکل ۶ نمودار میزان سختی نانوکامپوزیت‌ها در درصدهای مختلف و زمینه تقویت‌نشده را نشان می‌دهد. روند رشد میزان سختی با افزایش درصد تقویت‌کننده و همچنین کاهش میانگین سختی نمونه ۵ درصد نسبت به ۳ درصد در نانوکامپوزیت‌ها مشاهده می‌شود. در تشریح دلیل کاهش سختی در این مورد، می‌توان اظهار داشت که تشکیل نقاط تمرکز تنش و نواحی متخلخل باعث کاهش میزان سختی نمونه شده است.

جدول ۲ خواص مکانیکی نانوکامپوزیت زمینه آلومینیوم آلیاژی

درصد وزنی تقویت‌کننده (%)	سختی (BHN)	استحکام تسلیم فشاری (MPa)	استحکام فشاری (MPa)
۰	۱۳۶±۸	۴۲۶	۴۶۳
۱	۱۴۸±۸	۴۵۶	۵۲۳
۳	۲۳۰±۸	۴۹۵	۵۳۸
۵	۲۰۱±۸	۴۵۵	۴۵۶



شکل ۶ سختی نانوکامپوزیت با زمینه آلومینیوم آلیاژی

در مطالعات اخیر، افزایش ۲۵ درصدی سختی با افزودن ۵ درصد حجمی ذرات آلومینا در زمینه آلیاژ آلومینیوم-روی [۱۳] و همچنین افزایش حدود ۱۰۰ درصد سختی آلومینیوم

بردن تقویت‌کننده، در آلیاژ نسبت به آلومینیوم خالص کمتر است. بیشتر بودن میزان کارسختی و استحکام در پودرهای آلیاژی نسبت به آلومینیوم خالص منجر به چسبندگی کمتر زمینه و تقویت‌کننده در نانوکامپوزیت زمینه آلیاژی شده و این موضوع موجب تقویت‌کنندگی کمتر در درصدهای بیشتر از الیاف می‌شود. بطوری که ضریب تقویت‌کنندگی کامپوزیتی (نسبت استحکام نهایی کامپوزیت به زمینه) در نانوکامپوزیت با زمینه آلیاژی و ۳ درصد وزنی تقویت‌کننده، برابر ۱/۱۶ شده، در صورتی که این ضریب برای نمونه معادل زمینه آلومینیومی ۲/۸۴ به دست آمد. این ضریب برای درصدهای مختلف الیاف در جدول ۳ خلاصه شده است.

علاوه براین، همان‌طور که در منحنی‌های تنش-کرنش نشان داده شده، دو تأثیر متقابل و همزمان افزایش تخلخل‌ها در کاهش استحکام و استحکام‌بخشی فاز تقویت‌کننده باعث اختلاف اندک استحکام فشاری نمونه نانوکامپوزیت ۱ درصد نسبت به ۳ درصد شده است. همچنین کاهش استحکام در افزایش حجمی انباشتگی الیاف در نمونه ۵ درصد، نتیجه چسبندگی کمتر و حتی در بعضی الیاف نبودن فصل مشترک بین زمینه و تقویت‌کننده، نسبت به نمونه ۳ درصد می‌باشد. این کاهش استحکام فشاری در کامپوزیت زمینه آلومینیوم بکارگیری بیشتر از ۱۰ درصد وزنی ذرات آلومینا نیز توسط رحیمیان و همکارانش [۸] مشاهده شده است.

بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی توسط جعفری و همکارانش [۲۰] نشان داده است که استحکام فشاری نانوکامپوزیت آلومینیوم آلیاژی ۲۰۲۴ با ۱ درصد حجمی نانولوله کربنی حدود ۴۰ درصد بیشتر از زمینه می‌باشد و سختی زمینه را از ۶۰ به ۲۲۶ ویکرز^۱ افزایش داده است.

جدول ۳ ضریب تقویت‌کنندگی الیاف در آلومینیوم خالص و آلیاژی

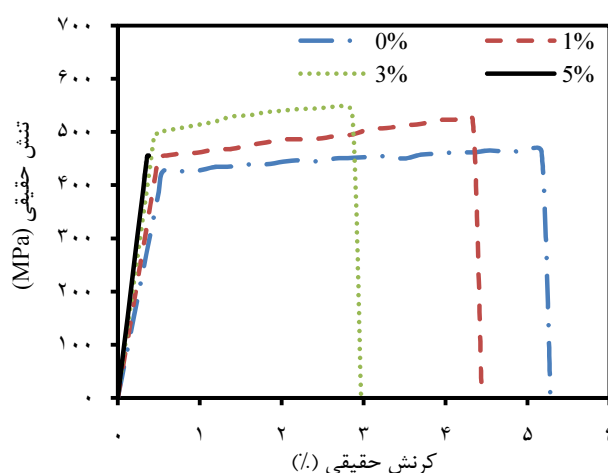
زمینه آلومینیوم خالص	زمینه آلومینیوم آلیاژی	درصد وزنی تقویت‌کننده (%)
۲/۳۶	۱/۱۳	۱
۲/۸۴	۱/۱۶	۳
۲/۹۱	۰/۹۸	۵

از مقایسه نتایج سختی و استحکام فشاری نانوکامپوزیت‌های

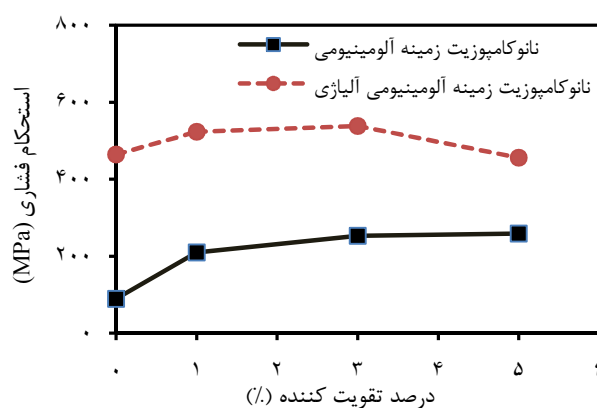
1. Vickers

دلایل افزایش مدول یانگ می‌توان به تأثیر وجود الیاف با مدول یانگ بالا در زمینه و بهم‌پیوستگی ساختاری در نانوکامپوزیت بین فاز تقویت‌کننده و زمینه اشاره کرد. البته به دلیل جهت‌های تصادفی الیاف و هم‌راستا نبودن همه الیاف با راستای اعمال تنش، مدول یانگ با افزایش درصد الیاف، افزایش چشم‌گیری نداشته است.

شکل ۸ نمودار استحکام فشاری در نانوکامپوزیت با زمینه‌های متفاوت، یکی با زمینه آلومینیوم خالص و دیگری با زمینه آلومینیوم آلیاژی را نشان می‌دهد.



شکل ۷ آزمون فشار نانوکامپوزیت با زمینه آلومینیوم آلیاژی



شکل ۸ استحکام نانوکامپوزیت با زمینه‌های آلومینیوم خالص و آلیاژی

زمینه آلیاژی به دلیل وجود رسوبات نانومتری در زمینه و همچنین پراکندگی مناسب آنها در تمام مناطق آلیاژ، استحکام بیشتری از خود نشان داده ولی نرخ افزایش استحکام در بکار

چسبندگی بین دو فاز کمتر می‌شود. همچنین کاهش چگالی نسبی نمونه‌ها با افزایش تقویت‌کننده این موضوع را بطور آشکار نشان می‌دهد. تأثیر افزایش درصد وزنی تقویت‌کننده در بهبود استحکام فشاری و سختی نانوکامپوزیت‌ها مشاهده شد. ولی به دلیل افزایش حجمی تخلخل‌ها و کاهش چسبندگی دو فاز، نرخ افزایشی خواص مکانیکی کاهش یافته و علاوه بر این، کاهش استحکام فشاری نمونه ۵ درصد نسبت به ۳ درصد مشاهده گردید. اگرچه مدول یانگ با افزایش الیاف تنها روند افزایشی داشته است. در نانوکامپوزیت‌ها با افزایش درصد تقویت‌کننده، فاصله بین الیاف موجود در زمینه کاهش یافته و حرکت نابجایی‌ها محدودتر شده است، در نتیجه این موضوع باعث کاهش تغییر طول نهایی و انعطاف‌پذیری شد. علاوه بر این، انرژی بیشتری برای عبور نابجایی‌ها لازم است، در نتیجه استحکام فشاری نمونه افزایش یافت.

همچنین به دلیل کار سختی کمتر در آلومینیوم خالص نسبت به آلومینیوم آلیاژی، در حین پرس گرم چسبندگی بهتری بین دو فاز بوجود آمده و در نتیجه میزان تقویت‌کنندگی الیاف در زمینه آلومینیومی خالص بسیار بیشتر شد.

۵- مراجع

- [1] Ashby M. F., Ferreira P. J., Schodek D. L., *Nanomaterials, Nanotechnologies and Design, Materials and Design*, 1st Ed., USA, Elsevier, 2009.
- [2] Tavoosi M., Karimzadeh F., Enayati M. H., "Fabrication of Al-Zn/ α -Al₂O₃ nanocomposite by mechanical alloying", *Materials Letters*, Vol. 62, No. 2, 2008, pp. 282-285.
- [3] Suryanarayana C., "Mechanical alloying and milling", *Progress in Materials Science*, Vol. 46, No. 1-2, 2001, pp. 1-184.
- [4] Flores-Campos R., Strada-Guel I., Miki-Yoshida M., Martinez-sánchez R., Herrera-Ramirez J. M., "Microstructure and mechanical properties of 7075 aluminum alloy nanostructured composite processed by mechanical milling and indirect hot extrusion", *Materials Characterization*, Vol. 63, 2012, pp. 39-46.
- [5] Suryanarayana C., "Recent developments in mechanical alloying", *Advance Materials Science*, Vol. 18, 2008, pp. 203-211.
- [6] Tavoosi M., Enayati M. H., Karimzadeh F., "Softening behaviour of nanostructured Al-14 wt% Zn alloy during mechanical alloying", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 464, No. 1-2, 2008, pp. 107-110.

تقویت‌شده با نانولوله کربنی [۲۰] و الیاف شیشه استفاده شده در این پژوهش می‌توان نتیجه گرفت که نانولوله‌های کربنی به دلیل استحکام بالاتر و همچنین سطوح بیشتر فصل مشترک با زمینه، افزایش استحکام بیشتری نسبت به الیاف شیشه در زمینه آلومینیومی ایجاد می‌کند.

همچنین استحکام فشاری کامپوزیت آلومینیوم با ۳ درصد وزنی ذرات آلومینا به حدود ۱۷۰ مگاپاسکال رسیده است [۸]. سختی و استحکام فشاری نانوکامپوزیت تقویت‌شده با الیاف شیشه در این مطالعه در مقایسه با کامپوزیت آلومینیوم آلیاژی با ذرات آلومینا [۸] استحکام فشاری و سختی بیشتری را نشان می‌دهد. الیاف به دلیل جلوگیری بیشتر از حرکت نابجایی‌ها و همچنین ایجاد مناطق تجمع نابجایی در اطراف الیاف باعث تقویت‌سازی بیشتر نسبت به ذرات میکرومتری در زمینه آلومینیومی می‌شود. علاوه بر این، هم راستا بودن بعضی از الیاف با راستای اعمال نیرو یکی از دلایل افزایش استحکام زمینه می‌باشد. اگرچه میزان تخلخل‌ها در اطراف الیاف بیشتر بوده و در نتیجه نمی‌توان از درصدهای بالاتر الیاف در کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی استفاده کرد.

۴- نتیجه‌گیری

پودر آلیاژ (آلومینیوم، ۸ درصد وزنی روی و ۳ درصد وزنی منیزیم) نانوساختار تقویت‌نشده توسط آلیاژسازی مکانیکی تولید شد و برای تولید نمونه بالک، پودرهای آلیاژ شده تحت فرایند پرس گرم، فشرده‌سازی شد. علاوه بر این، افزودن الیاف شیشه در مراحل اولیه آلیاژسازی و قراگیری آنها در بین لایه‌های تغییرشکل‌یافته زمینه، منجر به تولید نانوکامپوزیت زمینه آلومینیوم آلیاژی و با تقویت‌کننده ۱، ۳ و ۵ درصد الیاف شیشه شده است. فرایند پرس گرم در زمینه آلیاژی باعث جدایش رسوبات MgZn₂ از محلول جامد آلومینیومی شد. افزایش کارسختی ذرات پودر آلیاژ زمینه در آسیاب گلوله‌ای هنگام نانوساختار شدن و تشکیل رسوبات سخت پراکنده در زمینه در حین فشرده‌سازی، موجب کاهش انعطاف‌پذیری و افزایش تردی نسبت به آلومینیوم خالص شد.

تصاویر میکروسکوپ الکترونی از فصل مشترک بین دو فاز ماتریس و تقویت‌کننده در درصدهای مختلف نشان می‌دهد که با افزایش درصد تقویت‌کننده، میزان تخلخل‌ها افزایش و

- Element Method”, *Journal of Computational Methods in Engineering*, Vol. 31, No. 2, 2013, pp. 115-131 (In Persian).
- [15] Valibeygloo N., Khosroshahi R. A., “A Study on the Effect of Al₂O₃ Nano-particles on Aging Behavior and Mechanical Properties of Al-4.5wt.%Cu/Al₂O₃ Composites Produced by Stir Casting”, *Journal of Metallurgical and Materials Engineering*, Vol. 23, No. 2, 2012, pp. 33-45 (In Persian).
- [16] Kang G. Z., Yang C., Zhang J. X., “Tensile properties of randomly oriented short δ -Al₂O₃ fiber reinforced aluminum alloy composites. I. Microstructure characteristics, fracture mechanisms and strength prediction”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 33, No. 5, 2002, pp. 647-656.
- [17] Williamson G. K., Hall W. H., “X-ray line broadening from filed aluminium and wolfram”, *Acta Metallurgica*, Vol. 1, No. 1, 1953, pp. 22-31.
- [18] Sivasankarana S., Sivaprasad K., Narayanasamy R., Satyanarayana P. V., “X-ray peak broadening analysis of AA 6061_{100-x}-x wt.% Al₂O₃ nanocomposite prepared by mechanical alloying”, *Materials Characterization*, Vol. 62, No. 7, 2011, pp. 661-672.
- [19] Tabandeh khorshid M., Jenabali Jahromi S. A., Moshksar M. M., “Mechanical properties of trimodal Al matrix composites reinforced by nano- and submicron-sized Al₂O₃ particulates developed by wet attrition milling and hot extrusion”, *Materials and Design*, Vol. 31, No. 8, 2010, pp. 3880-3884.
- [20] Jafari M., Abbasi M. H., Enayati M. H., Karimzadeh F., “Mechanical properties of nanostructured Al₂₀₂₄-MWCNT composite prepared by optimized mechanical milling and hot pressing methods”, *Advanced Powder Technology*, Vol. 23, No. 2, 2012, pp. 205-210.
- [7] Yandong Jia, Fuyang Cao, Zhiliang Ning, Shu Guo, Pan Ma, Jianfei Sun, “Influence of second phases on mechanical properties of spray-deposited Al-Zn-Mg-Cu alloy”, *Materials and Design*, Vol. 40, 2012, pp. 536-540.
- [8] Rahimian M., Parvin N., Ehsani N., “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*, Vol. 527, No. 4-5, 2010, pp. 1031-1038.
- [9] Tang F., Anderson I. E., Biner S. B., “Solid state sintering and consolidation of Al powders and Al matrix composites”, *Journal of Light Metals*, Vol. 2, No. 4, 2002, pp. 201-214.
- [10] Moradkhani A. R., Baharvandi H. R., Tajdari M., “Investigation of mechanical properties and microstructure of B₄C-C composites fabricated by hotpress”, *Journal of Modares Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 6, 2012, pp. 10-18 (In Persian).
- [11] Sharma S. C., Krishna M., Shashishankar A., Paul Vizhian S., “Damping behaviour of aluminium/short glass fibre composites”, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 364, No. 1-2, 2004, pp. 109-116.
- [12] Woo K. D., Zhang D. L., “Fabrication of Al-7wt%Si-0.4wt%Mg/SiC nanocomposite powders and bulk nanocomposites by high energy ball milling and powder metallurgy”, *Current Applied physics*, Vol. 4, No. 2-4, 2004, pp. 175-178.
- [13] Tavoosi M., Karimzadeh F., Enayati M. H., Heidarpour A., “Bulk Al-Zn/Al₂O₃ nanocomposite prepared by reactive milling and hot pressing methods”, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 475, No. 1-2, 2009, pp. 198-201.
- [14] Adibi S., Ziaei Rad S., Karimzadeh F., “Fabrication, Measurement and Mechanical Property Evaluation of Nanocomposite Al6061-Al₂O₃ Using Finite