



ساخت و بررسی خواص مکانیکی مواد مرکب زمینه آلومینیومی تقویت شده با الیاف کوتاه کربن به روش متالورژی پودر

علی علیزاده*¹، محسن حیدری بنی²، محمدرضا زحمتکش³، جعفر اسکندری جم⁴

1- دانشیار، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران.

2- دانشجوی دکتری، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران.

3- دانش آموخته کارشناسی ارشد، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران.

4- استاد، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران.

* تهران، صندوق پستی 16846-13114، a_alizadeh@mut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله:

در این پژوهش به منظور ساخت ماده مرکب زمینه فلزی از الیاف کوتاه کربن به عنوان تقویت کننده با درصدهای حجمی دو، چهار، شش و هشت درصد و پودر آلومینیوم 5083 استفاده شد. از آسیاب کم انرژی برای اختلاط مواد اولیه پودری در زمانهای آسیاب کاری مختلف استفاده گردید. پودرهای مخلوط شده به روش پرس گرم، با فشار 100 مگا پاسکال، دمای 500 درجه سانتی گراد، به مدت یک ساعت و در محیط گاز آرگون تف جوشی شد. به منظور ارزیابی نمونه های تف جوشی شده چگالی و آزمون های مکانیکی از جمله سختی سنجی، آزمون کشش و آزمون خمش سه نقطه ای مورد بررسی و در نهایت مقاطع شکست نمونه های کشش مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج آزمایش ها همراه با نمودار تغییرات، درصد تنش ها و همچنین شکل های میکروسکوپی برای هر یک از نمونه های ساخته شده استخراج گردید. بهترین نتایج برای نمونه ای مرکب با چهار درصد حجمی تقویت کننده با چگالی نسبی 4.98 درصد در زمان اختلاط بهینه ای چهار ساعت، استحکام کششی 28.360 مگا پاسکال، استحکام خمشی 77.423 مگا پاسکال و سختی 6.101 ویکرز با سازوکار شکست بیرون کشیده شدن الیاف و پل زدن ترک از روی الیاف، به دست آمد.

دریافت: 1402/09/05

پذیرش: 1402/11/07

کلیدواژگان

مواد مرکب زمینه فلزی، الیاف کوتاه کربن، پرس گرم، خواص مکانیکی

Manufacturing and investigation of mechanical properties of aluminum matrix composite materials reinforced with short carbon fibers using powder metallurgy method

Ali Alizadeh*¹, Mohsen Heydari Beni¹, Mohammad Reza Zahmatkesh¹, Jafar Eskandari Jam¹

1- Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

* P.O.B. 16846-13114, Tehran, Iran, a_alizadeh@mut.ac.ir

Keywords

Metal Matrix Composite Materials, Short Carbon Fiber Matrix, Hot Pressing, Mechanical Properties

Abstract

In this research, short carbon fibers were used as reinforcement with volume percentages of two, four, six and eight percent and aluminum powder 5083 in order to make the metal base composite material. A low-energy mill was used to mix powder raw materials at different milling times. The mixed powders were sintered by hot press method, with a pressure of 100 MPa, a temperature of 500 degrees centigrade, for one hour and in an argon gas environment. In order to evaluate the sintered samples, the density and mechanical tests including hardness test, tensile test and three-point bending test were investigated and finally the fracture sections of the tensile samples were studied. The results of the tests were extracted along with the graph of changes, the percentage of stresses and also the microscopic shapes for each of the manufactured samples. The best results for the composite sample with four volume percent of reinforcement with a relative density of 98.4% at the optimal mixing time of four hours, tensile strength of 360.28 MPa, bending strength of 423.77 MPa and Vickers hardness of 101.6 with the failure mechanism of pulling out fibers and bridges cracking on fibers was obtained.

Please cite this article using:

Alizadeh, A., Heydari Beni, M., Zahmatkesh, M. R., Eskandari Jam, J., "Manufacturing and investigation of mechanical properties of aluminum matrix composite materials reinforced with short carbon fibers using powder metallurgy method." In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 10, No. 4, pp. 2334-2347, 2024. <https://doi.org/10.22068/JSTC.2024.2015820.1871>

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

1- مقدمه

شناخت و توسعه مواد جدید با قابلیت‌های بالا، یکی از نیازهای اساسی امروز بشر و از شروط لازم برای پیشرفت تکنولوژی محسوب می‌شود. در همین راستا در حال حاضر مطالعات فراوانی بر روی گسترش مواد جدید انجام می‌پذیرد که از جمله این مواد می‌توان به مواد مرکب اشاره کرد. از جمله مواد مرکب زمینه فلزی که گستره‌ی وسیعی از فلزات و آلیاژها مانند آلیاژهای آلومینیوم، تیتانیوم، منیزیم، مس و نیکل را در برمی‌گیرد در این میان یکی از متداول‌ترین مواد مرکب زمینه فلزی، مواد مرکب پایه آلومینیوم و آلیاژهای آن است. علت استفاده از آلیاژهای آلومینیوم، چگالی کم، دمای ذوب نسبتاً پایین، نسبت استحکام به وزن بالا و شکل‌پذیری خوب و مقاومت به خوردگی مناسب عنوان شده است. در بین آلیاژهای آلومینیوم، آلیاژ A15083 به دلیل مقاومت به خوردگی بالا، به منظور استفاده در شرایط خوردنده بسیار مورد توجه است. پس از ساخت الیاف کربن، این رشته‌ها به دلیل خواص فوق‌العاده‌شان، به عنوان تقویت کننده در ساخت مواد مرکب مورد استفاده قرار گرفتند. این الیاف به علت مزایایی همچون استحکام و مدول ویژه بالا، استحکام خستگی زیاد، ضریب انبساط حرارتی و چگالی پایین و هدایت حرارتی و الکتریکی بالا، از کاربردهای گسترده‌ای در صنایع مختلف نظامی، هوافضا، ساختمانی، ورزشی و خودروسازی برخوردار هستند. تنها ایراد وارد بر این الیاف صرف‌نظر از مسئله زیست محیطی، مقاومت پایین آن‌ها در برابر ضربه و خمش است که این معایب با توجه به طریق استفاده‌ی آن‌ها به عنوان تقویت کننده در مواد مرکب به حداقل می‌رسد.

مواد مرکب زمینه فلزی را می‌توان به طرق گوناگون طبقه‌بندی کرد. این مواد مرکب دارای زمینه‌ای از یک فلز و یا آلیاژ فلزی هستند که توسط فاز دوم فلزی و یا سرامیکی تقویت شده است [1]. به منظور رسیدن به خواص مطلوب و موردنیاز، فاز زمینه می‌بایست به اندازه کافی، با الیاف اتصال داشته و همچنین از سطح آن‌ها در مقابل صدمات محافظت کند، به طوری که تنش‌های وارده، در تنش‌هایی به مراتب کمتر از تنش کاری مواد مرکب، به فاز تقویت کننده منتقل شوند [2]. به منظور انتخاب یک روش مهندسی مناسب برای تولید مواد مرکب زمینه فلزی، می‌بایست کمیت و توزیع فاز تقویت کننده (ذرات و الیاف)، آلیاژ زمینه و نیز کاربردهای مواد مرکب را مورد توجه قرار داد [3]. فرایند اصلی ساخت صنعتی مواد مرکب زمینه فلزی را می‌توان به دو دسته فرایند فاز مایع¹ و حالت جامد² تقسیم‌بندی کرد. فرایند فاز مایع با اتصال و تماس فاز مایع با فاز دوم و ایجاد فصل مشترک شناخته می‌شود. از این رو در این روش اتصالی محکم و قوی حاصل می‌گردد. اما از طرفی این فرایند ممکن است باعث شکل‌گیری لایه‌های مرزی ترد و شکننده شود. در روش فراوری در حالت جامد، به علت پائین تر بودن دمای فرایند، امکان تشکیل چنین لایه‌هایی بسیار کم است [4]. علاوه بر روش‌های حالت جامد و حالت مایع، دو روش حالت گازی³ و درجا⁴ نیز استفاده می‌شود. البته باید توجه داشت که بعضی از روش‌های تولید فقط مختص یکی از این دسته‌ها نبوده، بلکه وابسته و مشترک بین دو یا چند روش تولید هستند [5]. یکی از روش‌های فراوری مواد مرکب زمینه فلزی روش متالورژی پودر است که برای ساخت مواد مرکب زمینه فلزی با فاز تقویت کننده پیوسته و غیر پیوسته استفاده می‌شود. در این روش معمولاً پودر سرامیک و فلز باهم مخلوط شده و

در دمای پائین به صورت ایزو استاتیک فشرده می‌شوند، سپس توسط پرس گرم تحت فشار قرار گرفته تا به چگالی کامل برسند. قطعه متراکم به دست آمده اغلب تحت عملیات ثانویه از قبیل اکستروژن یا فورج قرار می‌گیرد [1]. روش متالورژی پودر شامل قرار دهی تحت فشار، تف جوشی و روش‌های ثانویه‌ی شکل دهی و متراکم سازی است. روش قرار دهی تحت فشار به دو دسته کلی فشردن سرد و گرم تقسیم‌بندی می‌شوند. این روش‌های فشردن می‌توانند به صورت تک محوری و یا ایزو استاتیک انجام شوند. زمانی که از روش‌های فشردن سرد استفاده می‌شود، پس از پرس قطعه مرکب، می‌بایست آن را تحت عملیات تف جوشی قرار داد تا اتصال مابین ذرات پودری محکم‌تر شود. هنگامی که از روش‌های فشردن گرم استفاده می‌شود، به دلیل تف جوشی هم زمان با فشار، دمای عملیات کاهش می‌یابد. بر این اساس روش‌های فشردن مخلوط پودری در فرایند متالورژی پودر شامل فرایندهای پرس گرم⁵، پرس ایزو استاتیک گرم⁶، پرس سرد⁷، پرس ایزو استاتیک سرد⁸ و متراکم سازی از طریق شوک ناشی از انفجار⁹ می‌باشند [7، 8، 9]. همان‌طور که اشاره شد، در صورتی که از روش‌های فشردن سرد برای شکل‌دهی مخلوط پودری استفاده شود، می‌بایست پس از عملیات پرس کاری، تف جوشی انجام شود. تف جوشی فرایند اتصال ذرات پودری در دمای بالا است که بدون اعمال فشار انجام می‌شود [10]. در بعضی موارد نیز فرایندهای مختلف تثبیت و متراکم سازی و فرایندهای ثانویه شکل‌دهی باهم ادغام شده و در نتیجه مزیت‌های جدیدی را ایجاد می‌کنند که برای رسیدن به چگالی‌هایی در حد تئوری و یا هم‌راستا و مرتب کردن اجزای فاز تقویت کننده و دستیابی به خواص کنترل‌شده‌ی جهت‌دار¹⁰ کاربرد دارد [11]. در مواد مرکب زمینه فلزی همواره یک شیب پتانسیل شیمیایی در فصل مشترک زمینه-تقویت کننده وجود دارد. این بدین معناست که اگر در شرایطی، دما به قدر کافی بالا یا زمان به اندازه کافی طولانی باشد، نفوذ و یا واکنش‌های شیمیایی بین اجزا رخ می‌دهد. در پیوندهای شیمیایی، اتم و یا موکول توسط فرایندهای نفوذی انتقال می‌یابند. بنابراین در ناحیه‌ی فصل مشترک احتمال تشکیل ترکیب و یا محلول جامد وجود خواهد داشت. این اتفاق باعث تشکیل یک ناحیه فصل مشترکی حاوی یک محلول جامد و یا یک ناحیه واکنشی فصل مشترک زمینه-تقویت کننده می‌شود. در صورتی که فازهای تشکیل شده در ناحیه فصل مشترکی خواص نامطلوبی داشته باشند، بر روی خواص ماده مرکب تولیدی نیز اثر گذاشته و افت خواص آن را به همراه خواهند داشت. واکنش‌های فصل مشترک در مواد مرکب زمینه فلزی در اغلب موارد واکنش‌های مضر هستند که می‌تواند باعث ضعیف شدن پیوند زمینه و تقویت کننده شوند. با توجه به اینکه دمای تف جوشی با فشار گرم کمتر از 500 درجه سانتی‌گراد است، امکان تشکیل فاز ترد در فصل مشترک زمینه-الیاف وجود ندارد، زیرا در مورد آلومینیوم تقویت شده با الیاف کربن در حین فرایند تولید و یا تحت شرایط کاری در دمای بالای 500 درجه سانتی‌گراد فاز Al_4C_3 تشکیل می‌شود. Al_4C_3 فازی ترد است که اثرات مخربی از جمله افت استحکام، مقاومت به ضربه و مقاومت به خوردگی به دنبال خواهد داشت [12]. فرایند تشکیل کاربرد آلومینیوم یک فرایند نفوذی است. بنابراین نیازمند دما و زمان کافی است که با افزایش این دو مؤلفه ضخامت لایه‌ی

6- Hot isostatic pressing (HIP)
7- Cold pressing
8- Cold isostatic pressing (CIP)
9- Explosive Shock Consolidation
10- Direction-controlled properties

1- Liquid state process
2- Solid state process
3- Gas state
4- In-situ
5- Hot pressing

با وجود خواص منحصربه‌فرد الیاف کربن، از جمله چگالی پایین، استحکام و مدول بالا، این ماده می‌تواند به عنوان یک تقویت کننده‌ی مناسب در مواد مرکب زمینه آلومینیومی مورد استفاده قرار گیرند و در نتیجه مواد مرکب با نسبت استحکام به وزن بالا حاصل شود.

2- تعریف مسئله

روش‌های ذوبی به دلیل هزینه‌ی ظاهری تولید پایین‌تر نسبت به روش‌های حالت جامد، بیشتر مورد بررسی قرار گرفته‌اند، اما استفاده‌ی صنعتی از آن‌ها به دلیل فرایندهای پرهزینه و زمان بری مثل پوشش دهی و ایراداتی چون عدم توزیع یکنواخت الیاف تقویت کننده در زمینه و احتمال بالای آگلومره شدن الیاف و یا آسیب دیدن آن‌ها طی فرایند ریخته‌گری تحت دمای بالا و یا احتمال بالای اکسید شدن الیاف یا پوشش در دمای بالای فرایند، موجب کاهش ضریب اطمینان در تولید انبوه این دسته از مواد مرکب می‌شود و به نوبه‌ی خود مانعی برای توسعه‌ی کاربردی آن‌ها است. در حالی که روش‌های حالت جامد مثل متالورژی پودر علی‌رغم هزینه‌ی تجهیزات بالاتر نسبت به روش‌های ذوبی با حذف مراحل زمان بری مثل پوشش دهی و کاهش احتمال آسیب دیدن الیاف و تشکیل فازهای ناخواسته‌ی مضر مثل کاربید آلومینیوم، به دلیل دمای پایین‌تر فرایند و به تبع مصرف پایین‌تر انرژی و کاهش اتلاف آن می‌تواند آینده‌ی روشن‌تری نسبت به روش‌های ذوبی، به منظور افزایش کاربرد این دسته از مواد در صنایع مختلف داشته باشد.

در ادامه خواص مواد موردنظر و مراحل تحقیق بیان شده است.

1-2- خواص مواد

در این پژوهش از پودر آلومینیوم آلیاژی Al5083 به عنوان زمینه‌ی ماده مرکب استفاده شده است که به روش افشانش گازی⁵ در متالورژی پودر مشهد ساخته شده بود. پودر مذکور دارای متوسط اندازه ذرات 50 میکرومتر بوده است. مورفولوژی ذرات پودر آلومینیوم 5083 مورد استفاده در این پژوهش در شکل 2 نشان داده شده است. ترکیب شیمیایی پودر Al5083 استفاده شده در این پژوهش که به روش طیف‌سنجی جذب اتمی تعیین شد، در جدول 1 آمده است.

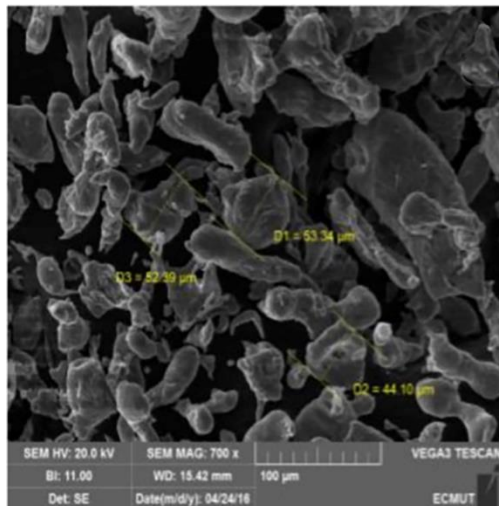


Fig. 2 The SEM image of aluminum 5083 powder particles and their average particle size

شکل 2 تصویر SEM ذرات پودر آلومینیوم 5083 و متوسط اندازه ذرات آن

واکنشی افزایش است [13]. شکل 1 حضور فاز Al_4C_3 در فصل مشترک الیاف کربن و زمینه‌ی آلومینیوم را نشان می‌دهد.

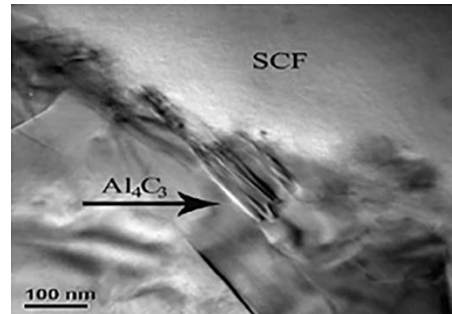


Fig. 1 The aluminum carbide phase in the interface of aluminum and carbon fibers in the composite [13]

شکل 1 فاز کاربید آلومینیوم در فصل مشترک آلومینیوم و الیاف کربن [13]

از پژوهش‌های صورت گرفته بر روی زمینه‌های آلومینیومی تقویت شده با الیاف کوتاه کربنی می‌توان به تغییرات استحکام و سختی ماده مرکب با زمینه آلیاژ آلومینیوم 6061 تقویت شده با الیاف کربنی پوشش داده شده با مس که با استفاده از روش ریخته‌گری گردابی تولید شده است اشاره کرد [14]. جعفری¹ [15] در پژوهشی به مطالعه‌ی تاثیر درصد الیاف کربنی و پوشش دهی نیکل-فسفر بر استحکام خمشی مواد مرکب $Al_{2024}-C_f$ تولید شده به روش ریخته‌گری گردابی پرداخته است. در این پژوهش مشخص شد که با افزایش درصد الیاف کربن استحکام خمشی نیز افزایش یافته است و این افزایش برای نمونه‌های پوشش دار بیشتر است. باوسینگ² و همکارانش [14] تغییرات استحکام ماده مرکب زمینه آلیاژ 6061 تقویت شده با الیاف کربن پوشش داده شده با مس که با استفاده از روش ریخته‌گری گردابی تولید شده بود را مورد ارزیابی قرار دادند. مشخص شد که مقدار استحکام به مقدار الیاف اضافه شده بستگی دارد. به طوریکه با افزایش الیاف تا 4 درصد وزنی، استحکام کششی و تسلیم افزایش و بعد از آن کاهش می‌یابد. دشپانده³ و همکاران [16] گزارش کردند که خواص مکانیکی و هدایت الکتریکی ماده مرکب زمینه آلومینیوم 7075 تقویت شده با الیاف کربن تولید شده به روش پرس گرم با افزایش مقدار الیاف کربن کاهش و هدایت حرارتی افزایش قابل توجهی می‌یابد. کومار⁴ و همکاران [17] خواص مکانیکی ماده مرکب زمینه آلومینیوم 7075 تقویت شده با الیاف کوتاه پوشش نیکل داده شده به روش الکترولس را بررسی کردند. از نتایج این پژوهش، مشخص شد که روش الکترولس پوششی را ارائه می‌دهد که ضخامت یکنواخت‌تری دارد که ضخامت و مورفولوژی لایه‌های نیکل همواره به شرایط فلزی شدن از نظر زمان، دمای حمام و pH بستگی دارد. اگرچه این یک واکنش شیمیایی کنترل شده است، اما هزینه مواد شیمیایی مورد نیاز برای فرایند بالا است. همچنین استحکام تسلیم، استحکام شکست و سختی این ماده مرکب با افزایش الیاف کوتاه کربن تا 8 درصد وزنی، افزایش می‌یابد.

با توجه به جست‌وجوهای انجام شده پژوهشی در زمینه ساخت و بررسی خواص مکانیکی مواد مرکب زمینه آلومینیوم 5083 تقویت شده با الیاف کوتاه کربن به روش متالورژی پودر یافت نشد. عمده پژوهش‌ها در زمینه مواد مرکب زمینه آلومینیومی مبتنی بر استفاده از تقویت کننده‌های ذره‌ای است.

⁴ Kumar

⁵ Gas atomization

¹ Jaafari

² Bhav Singh

³ Deshpande

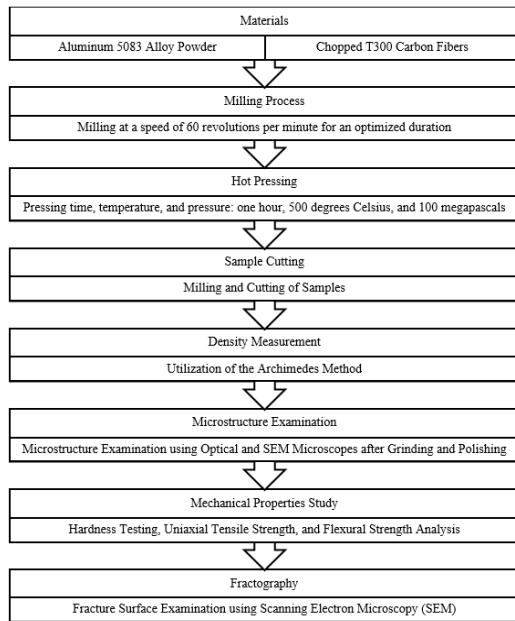


Fig. 4 Research Methodology Stages

شکل 4 مراحل انجام پژوهش

جدول 3 زمان آسیاب کاری نمونه‌ها

Table 3 Milling Time for Work Piece Samples

نمونه	زمان آسیاب کاری (ساعت)
نمونه با صفر درصد حجمی تقویت کننده	-
نمونه با دو درصد حجمی تقویت کننده	2
نمونه با چهار درصد حجمی تقویت کننده	4
نمونه با شش درصد حجمی تقویت کننده	10
نمونه با هشت درصد حجمی تقویت کننده	28

3-2- فرایند پرس گرم

پس از فرایند آسیاب، به منظور متراکم سازی و تولید نمونه از روش پرس گرم¹ استفاده شد. برای این منظور ابتدا پودرها توسط پرس هیدرولیکی با ظرفیت 100 تن، در ماتریسی استوانه‌ای شکل به قطر نه سانتی‌متر از جنس فولاد گرم کار H13، تحت محیط گاز آرگون، فشرده شدند. زمان، دما و فشار فشردن یک ساعت، 500 درجه‌ی سانتی‌گراد و 100 مگا پاسکال در نظر گرفته شد. با توجه به عدم وجود داده‌های مناسب به منظور پرس گرم ماده مرکب زمینه آلومینیوم 5083 تقویت شده با الیاف کوتاه کربنی، شرایط پرس گرم با ثابت در نظر گرفتن دما و زمان فرایند، در سه فشار 25 و 50 و 100 مگا پاسکال به منظور تولید ماده مرکب با چهار درصد حجمی الیاف تقویت کننده آزمایش شد. تنها نمونه‌ی با فشار 100 مگا پاسکال به چگالی نسبی بالای 95 درصد رسید (به همین دلیل این فشار مورد استفاده قرار گرفت). در بدو شروع فرایند پرس گرم به منظور خروج هر چه بیشتر گازهای موجود بین ذرات پودری و کاهش فاصله نفوذی حین تفجوشی، نمونه‌ها درون قالب در فشار 100 مگا پاسکال در دمای محیط فشرده شدند. برای جلوگیری از اصطکاک پودر با جداره قالب از روان کار مخصوص و دما بالا استفاده شد. نمونه‌های پرس گرم شده دارای قطر 9 سانتی‌متر و ارتفاع 1 سانتی‌متر بودند. در نهایت مواد مرکب زمینه آلومینیومی تقویت شده با الیاف کوتاه کربنی با ترکیب‌هایی که در جدول 4 آورده شده است، ساخته شد.

جدول 1 ترکیب شیمیایی پودر Al5083 استفاده شده در این پژوهش

Table 1 The chemical composition of the Al5083 powder used in this case

Zn	Cu	Ti	Fe	Mn	Si	Mg	Cr	Al	عناصر
0.25	0.1	0.15	0.4	0.4	0.7	4.5	0.23	باقی	%Wt

تقویت کننده مورد استفاده، الیاف کربن با نام تجاری T300 است که از مهم‌ترین خواص این الیاف می‌توان به استحکام کششی و سختی بالای آن‌ها و از نقاط ضعف این الیاف نیز می‌توان به قیمت بسیار بالا، استحکام برشی ضعیف و شکنندگی نسبتاً بالا اشاره نمود. در شکل 3 تصویر الیاف و در جدول 2 خواص مورد استفاده آن نشان داده شده است. مراحل انجام تحقیق در شکل 4 نشان داده شده است.

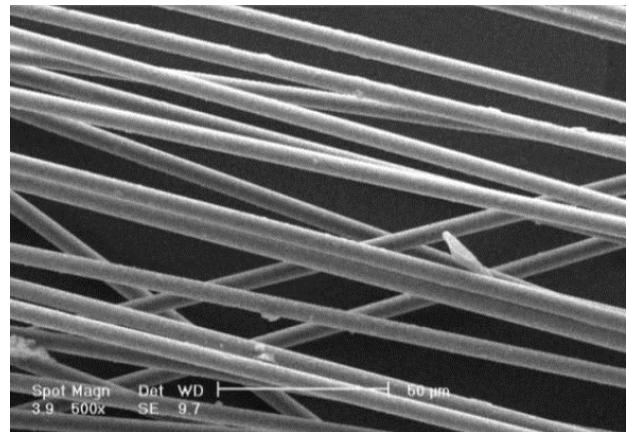


Fig. 3 SEM image of T300 carbon fibers

شکل 3 تصویر SEM از الیاف کربن T300

جدول 2 خواص الیاف کربن T300 مورد استفاده در این پژوهش

Table 2 The properties of T300 carbon fibers utilized in this case

نام تجاری	چگالی gr/cm ³	قطر μm	افزایش طول %	مدول GPa	استحکام کششی MPa
T300	1.76	7	1.5	230	3530

3-3- ساخت نمونه تجربی

در این بخش مراحل ساخت نمونه و روند انجام پژوهش شرح داده شده است.

3-1- آسیاب کم انرژی

ابتدا دسته الیاف توزین شده در اندازه‌ی تقریبی سه الی پنج میلی‌متر بریده شد. سپس به همراه مقادیر متناسبی از پودر آلیاژی زمینه به منظور ساخت نمونه‌هایی با کسر حجمی صفر، دو، چهار، شش و هشت درصد درون محفظه آسیاب کم انرژی ریخته شد. از آسیاب کم انرژی به دلیل کاهش احتمال آسیب دیدن الیاف حین مخلوط سازی نسبت به آسیاب‌های پرانرژی استفاده گردید. از آسیاب گلوله‌ای کم انرژی در محفظه‌ای از جنس PVC با گلوله‌های آلومینیومی به قطر 18 میلی‌متر با نسبت وزنی گلوله به پودر سه به یک و سرعت چرخش 60 دور بر دقیقه به منظور اختلاط کامل الیاف کوتاه کربنی و پودر آلیاژی زمینه استفاده شد. نمونه‌ها به منظور بهینه‌سازی زمان آسیاب کاری و کاهش آسیب به الیاف کربنی در بازه‌های زمانی دو ساعته به صورت بصری بررسی شدند (جدول 3).

¹ - Hot press

6-3- شکست نگاری

به منظور مطالعه‌ی نوع شکست، نمونه‌های کشیده شده در مقطع شکست بریده و به کمک دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی، بررسی گردید.

4- نتایج و بحث

در این بخش نتایج فرآیند ساخت نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

4-1- بررسی نتایج فرآیند آسیاب کاری

با توجه به جدول 3 با افزایش درصد الیاف تقویت کننده، زمان موردنیاز برای همگن شدن مخلوط پودری افزایش یافته است که دلیل این امر، افزایش انرژی و کار موردنیاز طی فرایند، با افزایش درصد الیاف تقویت کننده است. از طرف دیگر با توجه به هم سو بودن تمام الیاف در هر دسته، عمده نیرویی که می‌تواند باعث جدایش آن‌ها از هم شود، نیروی برشی در امتداد محور دسته الیاف خواهد بود که شرایط قرارگیری تمامی دسته الیاف در این حالت، با افزایش درصد الیاف در هر نمونه، مستلزم زمان آسیاب کاری بیشتری است. از هر نمونه 10 عدد ریز الیاف مطابق شکل 6 به صورت تصادفی از مخلوط پودری جدا، و طول آن‌ها اندازه‌گیری شد. در مواردی که الیاف دسته‌ای باقی‌مانده و به صورت کامل از یکدیگر جدا نشده بود، تعداد تقریبی الیاف به کمک میکروسکوپ نوری شمرده و نتایج در جدول 5 آورده شده است.

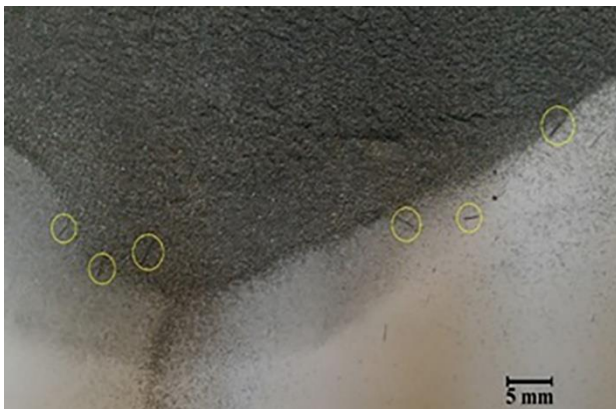


Fig. 6 Six Percent Volume Reinforcement Sample After Milling

شکل 6 نمونه‌ی شش درصد حجمی تقویت کننده، بعد از آسیاب کاری

جدول 5 میانگین طول و تعداد لیف‌های موجود در هر دسته الیاف بعد از آسیاب کاری
Table 5 Average Length and Number of Fibers in Each Fiber Category After Milling

نمونه	طول میانگین الیاف (mm)	بازه تعداد الیاف
نمونه با صفر٪ حجمی تقویت کننده	-	-
نمونه با دو٪ حجمی تقویت کننده	3.4	1-5
نمونه با چهار٪ حجمی تقویت کننده	3.2	1-8
نمونه با شش٪ حجمی تقویت کننده	2.9	5-12
نمونه با هشت٪ حجمی تقویت کننده	3.8	>15

با افزایش درصد تقویت کننده تا شش درصد حجمی به دلیل افزایش زمان موردنیاز برای همگن شدن نمونه‌های پودری در آسیاب طول الیاف کوتاه‌تر شد که به دلیل شکسته شدن تعدادی از الیاف حین فرایند مخلوط سازی است. با افزایش درصد تقویت کننده تا هشت درصد حجمی علی‌رغم افزایش زمان آسیاب کاری، الیاف آسیب کمتری دیده و کمتر شکسته شده‌اند. دلیل این امر

جدول 4 ترکیب نمونه‌های ساخته شده

Table 4 Combination of Constructed Samples

نمونه	ترکیب
1	آلومینیوم آلیاژی 5083 بدون تقویت کننده
2	آلومینیوم آلیاژی 5083 با 2 درصد حجمی الیاف کوتاه کربنی T300
3	آلومینیوم آلیاژی 5083 با 4 درصد حجمی الیاف کوتاه کربنی T300
4	آلومینیوم آلیاژی 5083 با 6 درصد حجمی الیاف کوتاه کربنی T300
5	آلومینیوم آلیاژی 5083 با 8 درصد حجمی الیاف کوتاه کربنی T300

3-3- ریزساختار

در این پژوهش ریزساختار نمونه‌های پرس گرم شده مورد مطالعه قرار گرفت. برای این منظور از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل XL30 VEGA-III ساخت شرکت TESCAN مجهز به طیف‌سنج EDS و تفنگ الکترونی انتشار میدانی هگزابوراید لانتانیم، LaB6، مطابق استفاده شد. جهت آماده‌سازی نمونه‌ها ابتدا سطح قطعات با سمباده‌های 100 و 200 و 400 و 600 و 800 و 1200 سمباده زنی و با خمیر پولیش حاوی آلومینای 3 و 1 میکرومتر در دو مرحله پولیش شدند. سپس نمونه‌ها در محلول تجاری پنتون¹ به مدت 20 الی 40 ثانیه قرار داده شد.

4-3- چگالی سنجی

چگالی نمونه‌ها، به روش غوطه‌وری یا ارشمیدس طبق استاندارد ASTM B962 اندازه‌گیری شد.

5-3- خواص مکانیکی

به منظور بررسی خواص مکانیکی نمونه‌های پرس گرم شده از آزمون‌های کشش تک محوری، خمش سه نقطه‌ای و سختی سنجی ویکرز² استفاده شد. سختی سنجی به روش ویکرز، با نیروی پنج کیلوگرم، بعد سنباذه زنی تا شماره 1200 و برای هر نمونه پنج بار انجام شد. آزمون کشش از نمونه‌های تخت مطابق استاندارد ASTM E8/E8M (شکل 5)، برای نمونه‌های اندازه‌ی کوچک با سرعت 1 mm/min انجام شد و آزمون خمش سه نقطه‌ای تحت استاندارد ASTM E90 مطابق آورده شده است، انجام شد. در آزمون خمش، نمونه‌های تسمه‌ای به طول 50 میلی‌متر و مقطع مربعی به‌اندازه ضلع پنج میلی‌متر بریده شد. سرعت حرکت فک بالایی دو میلی‌متر بر دقیقه و طول تکیه‌گاه‌ها 22 میلی‌متر در نظر گرفته شد. آزمون‌های کشش و خمش، هر دو با دستگاه Santam STM 150 ساخت کشور ایران صورت پذیرفت.

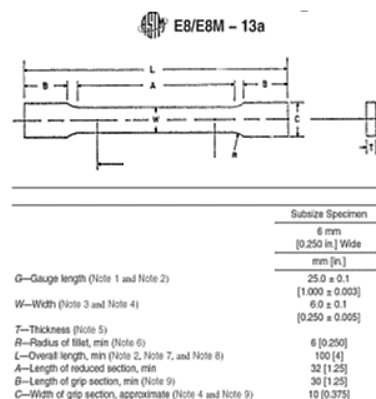


Fig. 5 Dimensions of the small tensile sample according to the ASTM E8/E8M standard

شکل 5 ابعاد نمونه کشش کوچک بر اساس استاندارد ASTM E8/E8M

² - Vickers hardness

¹ - Pantone

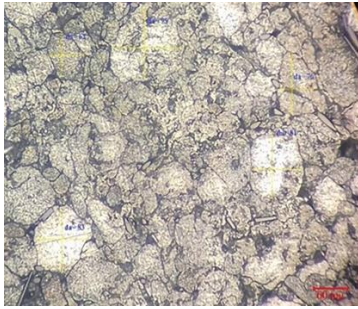


Fig. 9 Optical Microscope Image of Al 5083-4% vol C_{sf} Sample
شکل 9 تصویر میکروسکوپ نوری از نمونه‌ی Al 5083-4 % vol C_{sf}

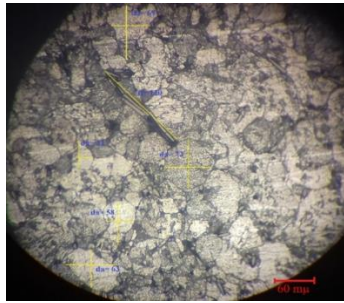


Fig. 10 Optical Microscope Image of Al 5083-6% vol C_{sf} Sample
شکل 10 تصویر میکروسکوپ نوری از نمونه‌ی Al 5083-6 % vol C_{sf}

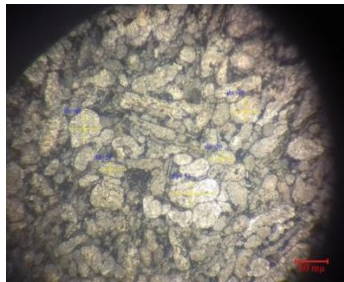


Fig. 11 Optical Microscope Image of Al 5083-8% vol C_{sf} Sample
شکل 11 تصویر میکروسکوپ نوری از نمونه‌ی Al 5083-8 % vol C_{sf}

همان‌طور که در تصاویر میکروسکوپ نوری قابل مشاهده است، اکثر الیاف در مرز دانه‌ها قرار گرفته‌اند که این امر را می‌توان به عدم ترشوندگی الیاف در فاز زمینه نسبت داد. البته در شکل 8 تعدادی از الیاف در نمونه‌ی با دو درصد حجمی تقویت کننده، درون یک دانه‌ی بزرگ قرار گرفته‌اند که می‌تواند به دلیل رشد دانه و حذف مرز دانه‌هایی که الیاف بین آن‌ها قرار گرفته بوده، باشد. از طرف دیگر با توجه به تصاویر، می‌توان مشاهده کرد که با افزایش درصد حجمی تقویت کننده اندازه‌ی دانه‌ها یکنواخت‌تر شده و اختلاف اندازه‌ی آن‌ها کاهش یافته است. این اختلاف اندازه‌ی دانه می‌تواند به دلیل رشد افراطی دانه‌ها در جهت‌گیری‌های مناسب رشد، باشد و با توجه به این فرض و یکنواخت‌تر شدن اندازه‌ی دانه‌ها با افزایش درصد حجمی تقویت کننده می‌توان نتیجه گرفت که الیاف کربن از رشد افراطی دانه‌ها جلوگیری کرده‌اند [19,18]. با توجه به تصاویر، در مورد نمونه‌های مرکب با افزایش درصد الیاف تقویت کننده تا چهار درصد، الیاف به صورت همگن در زمینه قرار گرفته‌اند اما با افزایش بیشتر، آگلومره¹ شدن الیاف کربن در زمینه افزایش یافته است که در شکل‌های 10 و 11 کاملاً قابل مشاهده است. البته نمی‌توان ادعا کرد که در نمونه‌های مرکب با درصد تقویت کننده‌ی دو و چهار درصد هیچ‌گونه مناطق

با توجه به تعداد بیشتر الیاف، در دسته الیاف همگن شده که در این مورد در هر دسته بیشتر از 15 لیف است، می‌توان نتیجه گرفت که دسته الیاف، به دلیل افزایش تعداد نسبت به نمونه‌های قبلی تحت انرژی کمتری مخلوط شده‌اند. لذا آسیب کمتری دیده و طول متوسط آن‌ها دچار کاهش کمتری شده است. همین تعبیر در مورد تعداد لیف‌های موجود در هر دسته از الیاف همگن شده نیز می‌تواند صادق باشد.

2-4- بررسی نتایج ریزساختار

برای بررسی نتایج میکروسکوپی در هر نمونه، میانگین قطر چهل دانه اندازه‌گیری شده و نتایج در جدول 6 آورده شده است.

جدول 6 میانگین اندازه دانه نمونه‌ها

Table 6 Average Particle Size of the Samples

Al 5083-8% C _{sf}	Al 5083-6% C _{sf}	Al 5083-4% C _{sf}	Al 5083-2% C _{sf}	Al 5083	نمونه
45.4	58.8	79.4	93.6	99.6	اندازه دانه متوسط (μm)

با توجه به داده‌های جدول 5 می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش درصد تقویت کننده‌ی الیافی، اندازه‌ی متوسط دانه‌ها کوچک‌تر شده است دلیل این امر می‌تواند به دلیل جلوگیری الیاف از تحرک سریع مرز دانه‌ها و بلعیدن دانه‌های مجاور باشد. تصاویر میکروسکوپ نوری نمونه‌ها، با صفر تا هشت درصد حجمی تقویت کننده با دو بزرگ‌نمایی 300 برابر، در شکل‌های 7 تا 11 ارائه شده است.

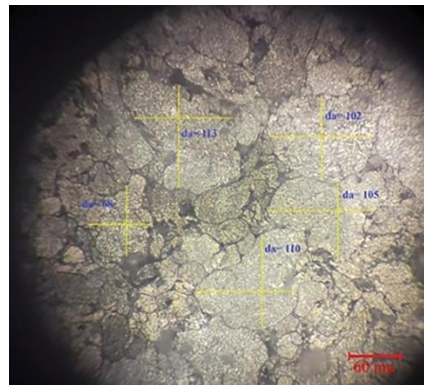


Fig. 7 Optical Microscope Image of Untreated Al 5083 Sample
شکل 7 تصویر میکروسکوپ نوری از نمونه‌ی Al 5083 بدون تقویت کننده

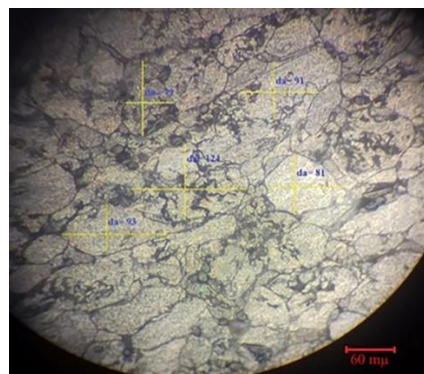


Fig. 8 Optical Microscope Image of Al 5083-2% vol C_{sf} Sample
شکل 8 تصویر میکروسکوپ نوری از نمونه‌ی Al 5083-2 % vol C_{sf}

¹ - Aggregation

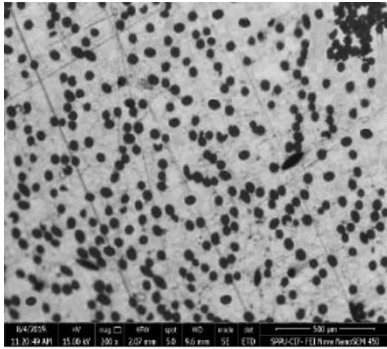


Fig. 15 SEM Image of Al 5083-8% vol Csf Sample

شکل 15 تصویر SEM نمونه‌ی Al 5083-8 % vol C_{sf}

فصل مشترک زمینه و الیاف تقویت کننده در نمونه‌ی با چهار درصد حجمی تقویت کننده در شکل 16 آورده شده است. همان‌طور در تصویر مشخص است، نواحی با رنگ روشن‌تر از زمینه اطراف الیاف را دربر گرفته است. این نواحی می‌تواند ناحیه‌ی واکنشی باشد و یا مربوط به نواحی پر تنش باشد که دچار مقداری کرنش به دلیل تنش پسماند حاصل از اختلاف ضریب انبساط حرارتی فاز زمینه و تقویت کننده باشد. در این میان به دلیل پایین بودن دمای فرایند و احتمال پایین تشکیل فاز واکنشی فرضیه‌ی دوم معقول‌تر به نظر می‌رسد [20].

3-4- بررسی نتایج چگالی سنجی

نتایج چگالی سنجی نمونه‌ها در جدول 7 آورده شده است. چگالی تئوری که از قانون مخلوط‌ها به دست آمده، با افزایش درصد تقویت کننده کاهش می‌یابد که به دلیل پایین‌تر بودن چگالی الیاف کربن نسبت به الیاز آلومینیوم است.



Fig. 16 SEM Image of the Interface Region in Al 5083-4% vol C_{sf} Sample

شکل 16 تصویر SEM از فصل مشترک نمونه‌ی Al 5083-4 % vol C_{sf}

جدول 7 نتایج چگالی سنجی نمونه‌های پرس گرم شده

Table 7 Results of Density Measurements for Hot-Pressed Samples

Al 5083-8% C _{sf}	Al 5083-6% C _{sf}	Al 5083-4% C _{sf}	Al 5083-2% C _{sf}	Al 5083	نمونه
1.83	2.93	2.62	2.01	3.01	وزن خشک (gr)
1.85	2.94	2.62	2.05	3.02	وزن اشباع (gr)
1.09	1.78	1.60	1.22	1.86	وزن غوطه‌وری (gr)
2.473	2.548	2.569	2.544	2.571	چگالی واقعی (gr/cm ³)
2.56	2.63	2.61	2.578	2.595	چگالی تئوری (gr/cm ³)
96.6	96.8	98.4	98.68	99.1	چگالی نسبی
3.4	3.2	1.6	1.32	0.9	درصد تخلخل

تجمع الیاف کربن وجود ندارد اما در صورت وجود، با توجه به داده‌های جدول 5، باید تعداد و مقدار الیاف تجمع کرده در آن مناطق کم‌تر باشد. در شکل 10 آسیب‌دیدگی و شکسته شدن الیاف قابل مشاهده است. این آسیب می‌تواند در دو مرحله‌ی پیش پرس یا پرس گرم و یا در مرحله‌ی سنباده زنی و پولیش اتفاق افتاده باشد، اما با توجه به اختلاف فاحش اندازه‌ی تقریبی لیف قبل از شکسته شدن که در شکل 9، 120 میکرومتر اندازه‌گیری شده است با داده‌های اندازه‌گیری طول الیاف بعد از فرایند آسیاب کاری در جدول 5، و همچنین خارج شدن تکه‌های آسیب دیده از حالت خطی می‌توان نتیجه گرفت این آسیب بیشتر طی فرایند پیش پرس و پرس گرم اتفاق افتاده باشد.

در خصوص نتایج میکروسکوپ الکترونی روبشی، تصاویر ریزساختار نمونه‌ها با درصد تقویت کننده‌ی دو تا هشت درصد در شکل‌های 12 تا 15 آورده شده است. این حاکی از توزیع یکنواخت الیاف در فاز زمینه در مورد نمونه‌های دو و چهار درصد است در حالی که نواحی آگلومره شده از الیاف کربن در زمینه‌ی نمونه‌های شش و هشت درصد، مشاهده می‌شود.

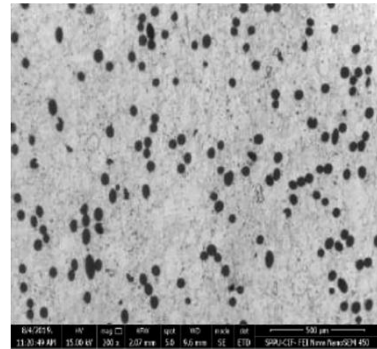


Fig. 12 SEM Image of Al 5083-2% vol C_{sf} Sample

شکل 12 تصویر SEM نمونه‌ی Al 5083-2 % vol C_{sf}

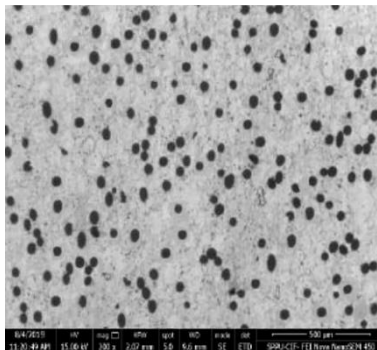


Fig. 13 SEM Image of Al 5083-4% vol C_{sf} Sample

شکل 13 تصویر SEM نمونه‌ی Al 5083-4 % vol C_{sf}

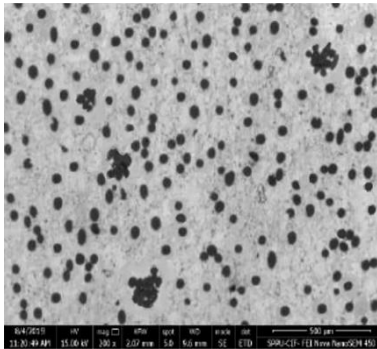


Fig. 14 SEM Image of Al 5083-6% vol C_{sf} Sample

شکل 14 تصویر SEM نمونه‌ی Al 5083-6 % vol C_{sf}

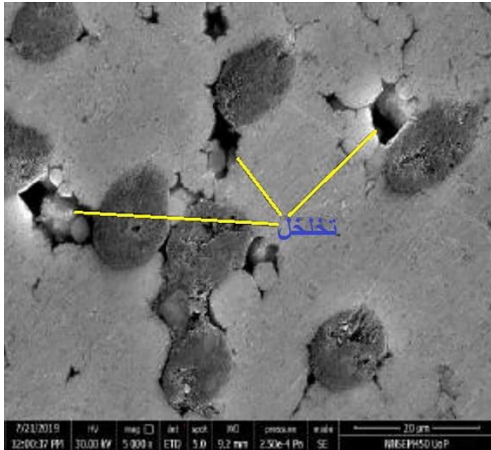


Fig. 19 SEM Image of Porosities Around Carbon Fibers in Al 5083-8% vol C_{sf} Sample

شکل 19 تصویر SEM از تخلخل‌های اطراف الیاف کربن در نمونه‌ی Al 5083-8% vol C_{sf}

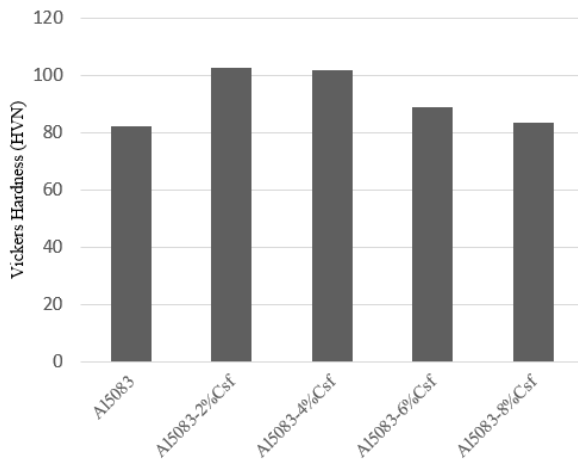


Fig. 20 Hardness of Hot-Pressed Samples

شکل 20 سختی نمونه‌های پرس گرم شده

همان‌طور در شکل 20 مشخص است، با افزایش درصد الیاف تقویت کننده تا دو درصد سختی افزایش و در مورد نمونه‌ی با چهار درصد تقویت کننده، مقدار اندکی کاهش یافته است. با افزایش درصد تقویت کننده به شش و هشت درصد حجمی، سختی به شدت افت کرده است که طبق پژوهش‌های پیشین [14]، این کاهش سختی به دلیل آگلومره شدن الیاف در زمینه است. ایجاد تخلخل در نمونه‌های با شش و هشت درصد حجمی تقویت کننده، مانع عملکرد سازوکار غلب افزایش سختی در مواد مرکب که همان انباشت نابجایی‌ها در اطراف فاز تقویت کننده است [20]، شده و سختی کاهش پیدا کرده است. میزان کم کاهش سختی در مورد نمونه‌ی با چهار درصد الیاف تقویت کننده، می‌تواند مؤید تعداد محدود مناطق آگلومره شده‌ی الیاف کربن در زمینه باشد. قابل ذکر است، کاهش سختی با افزایش درصد الیاف تقویت کننده بیش‌تر از یک درصد در روش ریخته‌گری گردابی، رخ داده است [14].

2-4-4- نتایج آزمون کشش

نتایج این آزمون در جدول 9 آورده شده است. نمودار تنش-درصد ازدیاد طول نمونه‌های پرس گرم شده در شکل‌های 21 تا 25 آورده شده است. داده‌های نمونه‌ی با هشت درصد حجمی تقویت کننده به دلیل شکستن در قسمت فک دستگاه کشش قابل ارائه نیست.

نتایج چگالی نسبی و درصد تخلخل به صورت نمودار در شکل‌های 17 و 18 ارائه شده است.

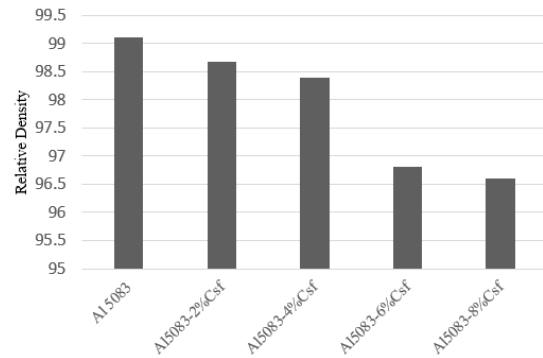


Fig. 17 Relative Density of Hot-Pressed Samples

شکل 17 چگالی نسبی نمونه‌های پرس گرم شده

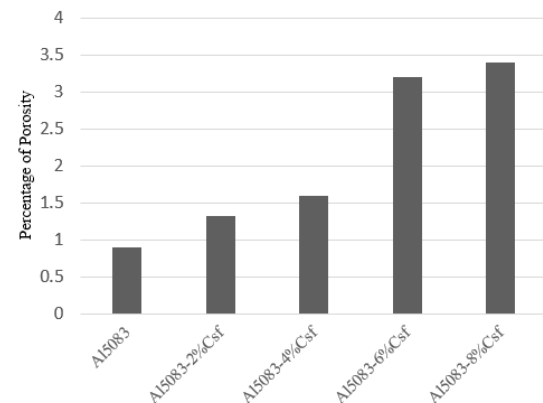


Fig. 18 Percentage of Porosity in Hot-Pressed Samples

شکل 18 درصد تخلخل نمونه‌های پرس گرم شده

با توجه به شکل‌های 17 و 18، با افزایش درصد تقویت کننده‌ی الیافی چگالی نسبی کاهش یافته و در نتیجه درصد تخلخل افزایش می‌یابد. در تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از فصل مشترک الیاف و زمینه‌ی نمونه‌ی مرکب با هشت درصد حجمی الیاف تقویت کننده (شکل 19)، تخلخل‌های کوچکی در اطراف الیاف قلیل مشاهده است که می‌تواند دلیل این کاهش چگالی نسبی باشد. البته آگلومره شدن الیاف در نمونه‌های مرکب با شش و هشت درصد حجمی الیاف تقویت کننده کاهش پله‌ای و غیریکنواخت این کاهش چگالی را توجیه می‌کند. از طرف دیگر افزایش فاز تقویت کننده‌ی الیافی با توجه به غیر منعطف بودن الیاف کربن در اندازه‌ی کوچک، می‌تواند دلیل دیگر این کاهش چگالی باشد. به طوری که منجر به جذب نیروی فشاری فرایند پرس گرم توسط الیاف و مصرف شدن این نیرو برای شکستن و جابجایی الیاف در زمینه شده باشد. این نتایج مطابق نتایج پژوهش‌های پیشین است [17,15,14].

4-4- بررسی نتایج خواص مکانیکی

4-4-1- نتایج سختی سنجی

آزمون سختی سنجی از نمونه‌ها که به روش ویکرز انجام شده بود در جدول 8 و شکل 20 ارائه شده است.

جدول 8 نتایج سختی سنجی نمونه‌های پرس گرم شده

Table 8 Results of Hardness Testing on Hot-Pressed Samples

Al 5083-8% vol	Al 5083-6% vol	Al 5083-4% vol	Al 5083-2% vol	Al 5083	نمونه
83.6	88.8	101.6	102.5	82.1	سختی ویکرز (HVN)

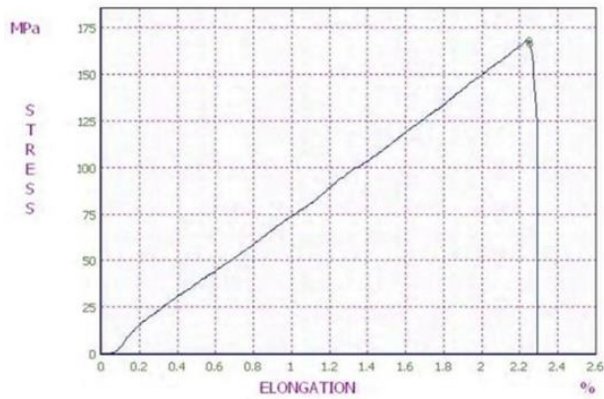


Fig. 24 Stress-Strain Curve for Hot-Pressed Al 5083-6% vol C_{sf} Sample
شکل 24 نمودار تنش- درصد ازدیاد طول نمونه‌ی Al 5083-6% vol پرس گرم

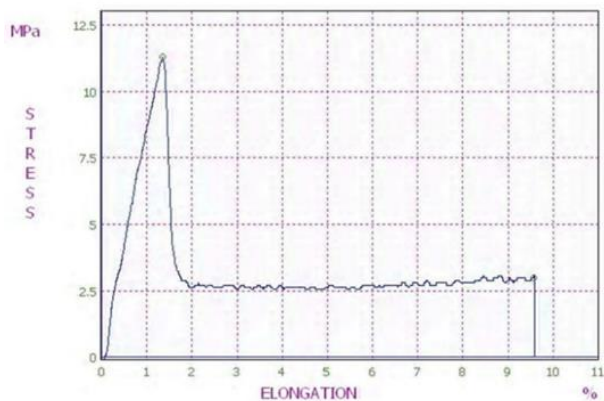


Fig. 25 Stress-Strain Curve for Hot-Pressed Al 5083-8% vol C_{sf} Sample
شکل 25 نمودار تنش- درصد ازدیاد طول نمونه‌ی Al 5083-8% vol پرس گرم

همان‌طور که در نمودارهای تنش- درصد ازدیاد طول مشخص است، با افزایش درصد تقویت کننده تا چهار درصد تنش‌های تسلیم و تنش شکست افزایش یافته و پس از آن رو به کاهش نهاده است. تغییرات تنش تسلیم و تنش شکست نمونه‌ها در شکل 26 به صورت نمودار نشان داده شده است.

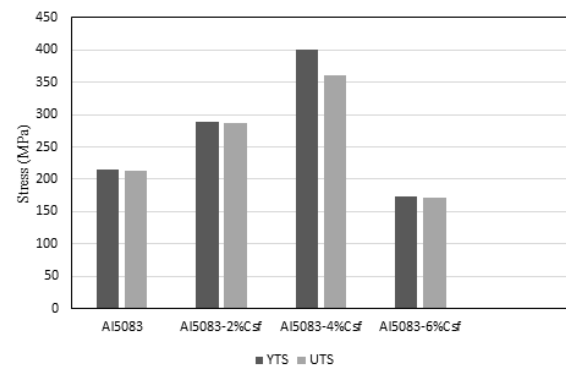


Fig. 26 Changes in Yield Stress and Fracture Stress of Hot-Pressed Samples

شکل 26 تغییرات تنش تسلیم و تنش شکست نمونه‌های پرس گرم شده

همان‌طور که در شکل 26 مشخص است، تنش‌های تسلیم و شکست نمونه‌ها با افزایش درصد تقویت کننده تا چهار درصد افزایش، و پس از آن دچار کاهش شده است. دلیل این روند افزایشی می‌تواند تأثیر حضور الیاف در زمینه و جلوگیری آن‌ها از حرکت مرز دانه‌ها و افزایش کار سختی باشد. به‌طوری که

جدول 9 نتایج کشش نمونه‌های پرس گرم شده

Table 9 Results of Tensile Testing on Hot-Pressed Samples

Al 5083-8% vol	Al 5083-6% vol	Al 5083-4% vol	Al 5083-2% vol	Al 5083	نمونه
-	173.55	400.47	288.3	214.49	تنش کششی نهایی (MPa)
-	171.21	360.28	286.3	212.15	تنش کششی تسلیم (MPa)
-	2.35	2.58	4.95	8.19	درصد ازدیاد طول

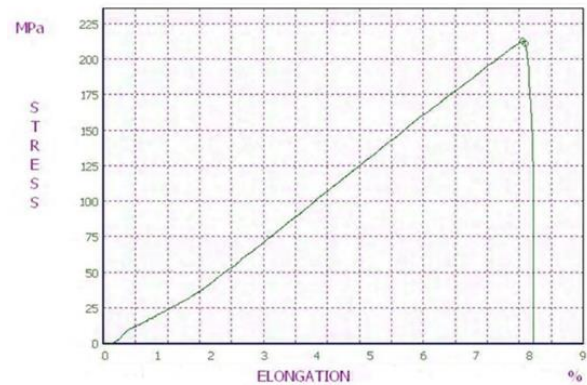


Fig. 21 Stress-Strain Curve for Hot-Pressed Al 5083 Sample

شکل 21 نمودار تنش- درصد ازدیاد طول نمونه‌ی Al 5083 پرس گرم شده

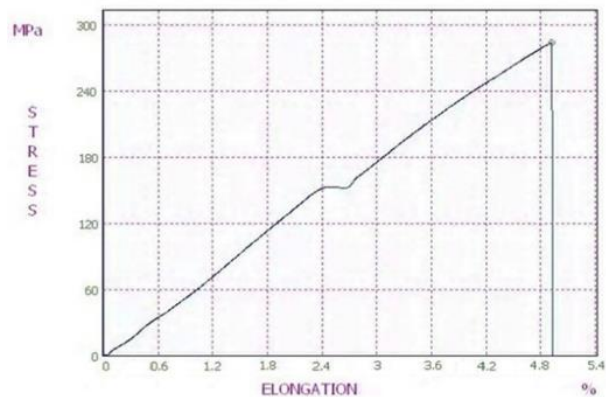


Fig. 22 Stress-Strain Curve for Hot-Pressed Al 5083-2% vol C_{sf} Sample

شکل 22 نمودار تنش- درصد ازدیاد طول نمونه‌ی Al 5083-2% vol پرس گرم

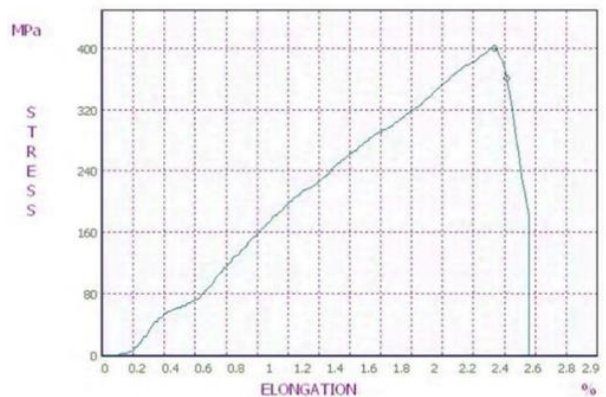


Fig. 23 Stress-Strain Curve for Hot-Pressed Al 5083-4% vol C_{sf} Sample

شکل 23 نمودار تنش- درصد ازدیاد طول نمونه‌ی Al 5083-4% vol پرس گرم

زمینه است. با توجه به اثر محل قرارگیری تقویت کننده‌ها، به دلیل عدم وجود تر شونده‌گی بین الیاف و زمینه، اکثر الیاف در مرز دانه‌های زمینه قرار گرفته‌اند. قرارگیری الیاف در این مناطق به دلیل ایجاد یک منطقه تششی که پیش‌تر به آن اشاره شد، باعث افزایش بیش‌تر سطح انرژی این مناطق شده و با ایجاد یک منطقه فشاری ممکن است به قفل شدن نایجایی‌ها پشت مرز دانه کمک کند. در اثر به استفاده از روش پرس گرم، انتظار می‌رود که اکثر الیاف در جهت‌های عمود یا نزدیک به عمود بر محور پرس گرم جهت‌گیری یافته باشند که این مطلب در تصاویر میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی روبشی مشهود است. در نتیجه با توجه به برش نمونه‌های کشش در جهت عمود بر محور پرس گرم، الیاف اکثراً باید در جهت‌های تصادفی در صفحات موازی با محور کشش جهت‌گیری یافته باشند. در نتیجه الیاف در زمینه‌ی تحت کشش، توسط دنیروی هم‌راستا با محور و عمود بر محور تحت بارگذاری قرار گرفته‌اند. در صورت اتصال مناسب زمینه و الیاف در فصل مشترک بیش‌ترین نیرو توسط الیافی که هم سو با محور کشش باشند، جذب خواهد شد و بقیه‌ی الیاف بیش‌تر تحت نیروی برشی قرار خواهند گرفت [21]. دو عامل مهم می‌تواند موجب افزایش استحکام در مواد مرکب تقویت شده با الیاف، شود. اولین عامل اتصال قوی بین الیاف و زمینه است به طوری که زمینه بتواند به خوبی بار اعمالی را به الیاف منتقل کند. عامل دوم بالاتر بودن استحکام الیاف از زمینه است. تئوری تأخیر برش بیان کننده‌ی این مطلب است که انتقال بار از زمینه به تقویت کننده به صورت عمده به شکل نیروی برشی در امتداد فصل مشترک عمل می‌کند. اما در صورت عدم اتصال مناسب بین الیاف و زمینه، الیاف کوتاه به صورت یک جای خالی عمل کرده و بعد از یک نسبت حجمی بحرانی باعث افت استحکام خواهند شد [20]. فرایند ساخت نمونه‌ها اعم از روش اختلاط، مواد اولیه مورد استفاده، روش چگالش نمونه‌ها و غیره، عواملی هستند که در فرایند ساخت مؤثر بوده و به تبع بر خواص مکانیکی نمونه‌ها از جمله خواص کششی تأثیرگذار می‌باشند. به عنوان مثال، استفاده از روش‌های حالت جامد مثل متالورژی پودر قطعاً با توزیع یکنواخت‌تر حاصل می‌کند در حالی که در روش‌های ذوبی احتمال آگلومره شدن الیاف حتی در درصد‌های بسیار پایین‌تر محتمل است که هر کدام به نوبه‌ی خود می‌توانند بر استحکام ماده مرکب حاصله تأثیرگذار باشند. با مقایسه نتایج ارائه شده در این بخش با استحکام آلیاژ 5083 کار شده می‌توان نتیجه گرفت که استحکام نهایی حدود 15 درصد افزایش یافته است.

3-4-4- نتایج آزمون خمشی

نتایج این آزمون در جدول 10 و نمودارهای تنش خمشی- طول تغییر شکل، در شکل‌های 27 تا 31 آورده شده است. همچنین در شکل‌های 32 و 33 تنش خمشی و طول تغییر شکل نمونه‌ها به صورت نمودار ارائه شده است. با افزایش درصد تقویت کننده میزان تغییر شکل حین خمش کاهش یافته و میزان تنش خمشی مشابه نمونه‌های کشش، با افزایش تقویت کننده تا چهار درصد حجمی افزایش و پس از آن دچار کاهش شده است. با توجه به این که رشد ترک در آزمون خمش از ناحیه‌ی تحت تنش کششی آغاز می‌شود و با توجه به تشابه روند تغییرات تنش خمشی با آزمون کشش، می‌توان تحلیل بیان شده در مورد آزمون کشش را به نتایج آزمون خمش تعمیم داد [17]. بر همین اساس تنش خمشی نمونه‌ها مشابه تنش کششی نهایی با افزایش درصد تقویت کننده تا چهار درصد حجمی از 98.354 MPa تا 97.423 MPa افزایش و پس از آن به دلیل تشکیل مناطق آگلومره شده‌ی الیاف تقویت کننده، تا 67.283 MPa کاهش یافته است. تغییر شکل نمونه‌ها تحت خمش با افزایش

نایجایی‌ها با رسیدن به الیاف قفل شده، مجبور به شکستن و یا دور زدن آن‌ها شده‌اند که این امر موجب افزایش نیروی کششی موردنیاز برای تسلیم و شکستن نمونه‌ها می‌شود [18]. این روند را می‌توان به توزیع یکنواخت الیاف در نمونه‌های با دو و چهار درصد حجمی تقویت کننده و حضور مناطق آگلومره شده‌ی الیاف در نمونه‌های با شش و هشت درصد حجمی تقویت کننده نسبت داد [21]. توزیع یکنواخت و حضور مناطق آگلومره شده در تصاویر میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی تأیید شده و کاهش درصد ازدیاد طول با افزایش درصد تقویت کننده است. تغییرات درصد ازدیاد طول با درصد تقویت کننده در شکل 27 آورده شده است. دلیل این امر می‌تواند ممانعت الیاف از تحرک مرز دانه‌ها و افزایش کار سختی باشد که موجب کاهش در تغییر شکل موم‌سان در نمونه‌ها و کاهش شکل‌پذیری آن‌ها شده و درصد افزایش طول را با افزایش تقویت کننده، کاهش داده است [18].

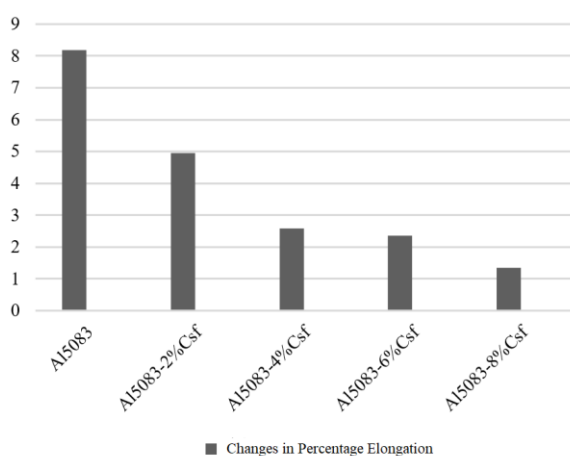


Fig. 27 Changes in Percentage Elongation of Hot-Pressed Samples

شکل 27 تغییرات درصد ازدیاد طول نمونه‌های پرس گرم شده

عوامل بسیاری می‌تواند بر استحکام کششی مواد مرکب زمینه فلزی تأثیرگذار باشد. از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر شکست و روند آن در مورد مواد مرکب زمینه فلزی می‌توان به ریزساختار، توزیع و مقدار تقویت کننده در زمینه، محل قرارگیری تقویت کننده، جهت‌گیری تقویت کننده، شرایط فصل مشترک و فرایند ساخت اشاره کرد [22].

با توجه به نتایج ریزساختار با افزایش درصد تقویت کننده از رشد افراطی دانه‌ها جلوگیری شده و اندازه‌ی دانه‌ها کاهش یافته است. این روند کاهش اندازه دانه باعث محدودتر شدن تحرک نایجایی‌های حاصل از اعمال نیروی کششی شده و باعث افزایش تنش تسلیم و شکست و همچنین کاهش میزان تغییر شکل نمونه‌ها شده است. با افزایش درصد تقویت کننده تا چهار درصد حجمی، توزیع الیاف در زمینه یکنواخت و پس از آن مناطق آگلومره شده‌ی الیاف کربن در زمینه (شکل‌های 14 و 15)، تشکیل یافته است. حضور این مناطق می‌تواند به عنوان یک عیب ساختاری، نقش محل‌های شروع رشد ترک را بازی کند و تنش تسلیم و شکست نمونه‌ها را به شدت کاهش دهد که در مورد نمونه‌های با شش و هشت درصد تقویت کننده که در شکل‌های 24 و 25 قابل مشاهده است، صادق است. اثر دیگر توزیع و مقدار الیاف در زمینه، می‌تواند کاهش میزان تغییر شکل زمینه به دلیل فشردگی حضور الیاف در زمینه و در نتیجه کاهش شکل‌پذیری، ازدیاد طول و کاهش مقدار گلوبی شدن شود [20]. در نتیجه می‌توان گفت که دلیل کاهش اختلاف تنش تسلیم و شکست نمونه‌ها، کاهش مقدار شکل‌پذیری قطعه‌ها به دلیل حضور الیاف در

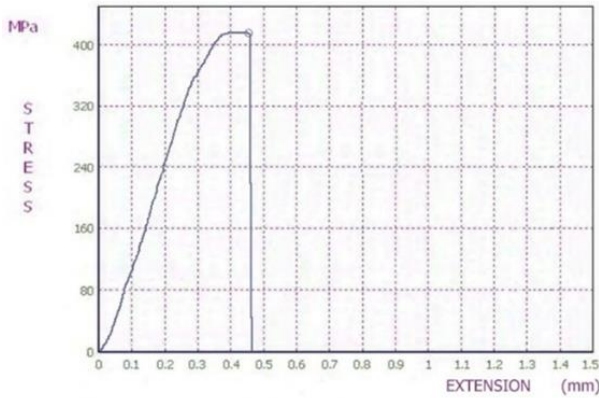


Fig. 30 Stress-Strain Curve for Hot-Pressed Al 5083-6% vol C_{sf} Sample
 شکل 30 نمودار تنش- طول تغییر شکل نمونه‌ی Al 5083-6% vol C_{sf} پرس گرم



Fig. 31 Stress-Strain Curve for Hot-Pressed Al 5083-8% vol C_{sf} Sample
 شکل 31 نمودار تنش- طول تغییر شکل نمونه‌ی Al 5083-8% vol C_{sf} پرس گرم

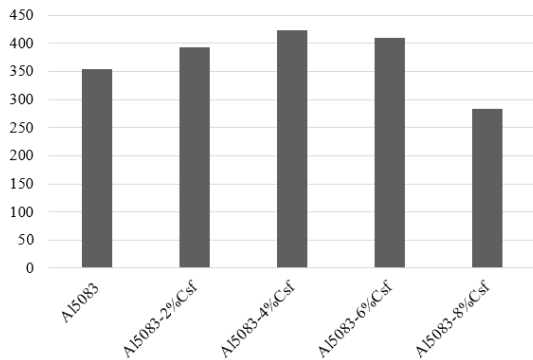


Fig. 32 Changes in Bending Stress of Hot-Pressed Samples
 شکل 32 تغییرات تنش خمشی نمونه‌های پرس گرم شده

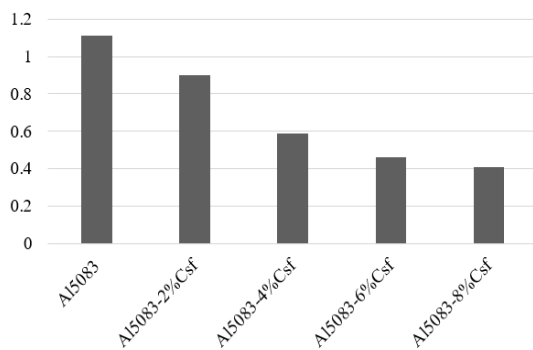


Fig. 33 Changes in Elongation of Hot-Pressed Samples
 شکل 33 تغییرات طول تغییر شکل نمونه‌های پرس گرم شده

درصد تقویت کننده به دلیل ممانعت الیاف از تغییر شکل مومسان زمینه، از 0.41 mm تا 1.11 mm دچار کاهش شد.

جدول 10 نتایج خمش نمونه‌های پرس گرم شده

Table 10 Results of Flexural Testing on Hot-Pressed Samples

Al 5083-8% vol	Al 5083-6% vol	Al 5083-4% vol	Al 5083-2% vol	Al 5083	نمونه
283.67	409.64	423.77	392.36	354.98	تنش خمشی (MPa)
0.41	0.46	0.59	0.9	1.11	طول تغییر شکل (mm)

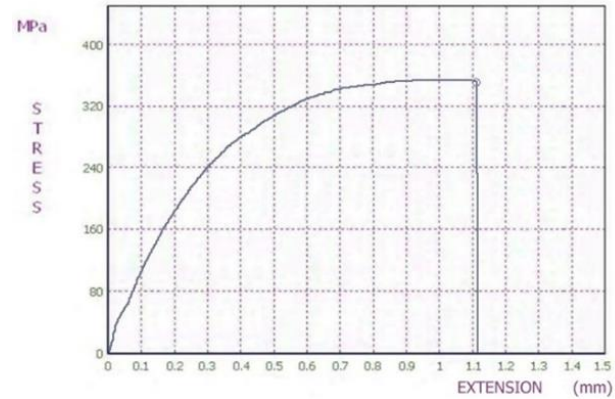


Fig. 27 Stress-Strain Curve for Hot-Pressed Al 5083 Sample
 شکل 27 نمودار تنش- طول تغییر شکل نمونه‌ی Al 5083 پرس گرم شده

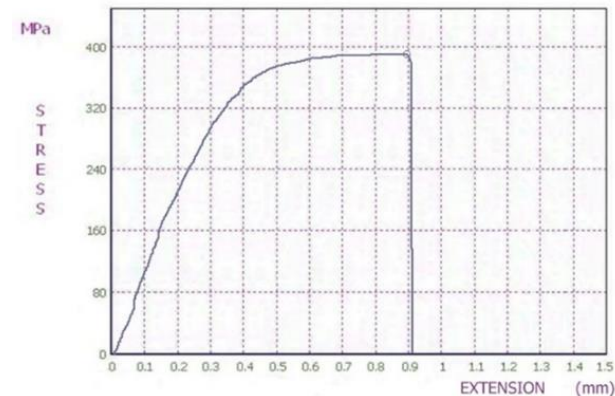


Fig. 28 Stress-Strain Curve for Hot-Pressed Al 5083-2% vol C_{sf} Sample
 شکل 28 نمودار تنش- طول تغییر شکل نمونه‌ی Al 5083-2% vol C_{sf} پرس گرم



Fig. 29 Stress-Strain Curve for Hot-Pressed Al 5083-4% vol C_{sf} Sample
 شکل 29 نمودار تنش- طول تغییر شکل نمونه‌ی Al 5083-4% vol C_{sf} پرس گرم

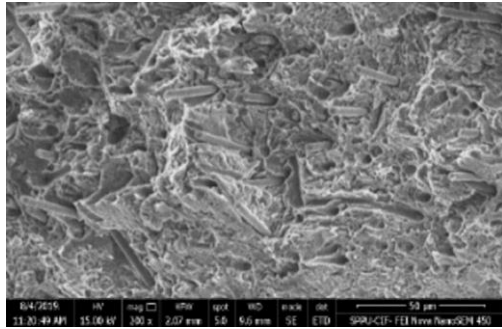


Fig. 38 SEM Image of Fracture Cross-Section of Al 5083-8% vol C_{sf} Sample

شکل 38 تصویر SEM از مقطع شکست نمونه‌ی Al 5083- 8% vol C_{sf}

همان‌طور که در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مشخص است با افزایش درصد تقویت کننده، تعداد و عمق تقریبی دیمپل‌ها کاهش یافته و از شکست نرم در نمونه‌ی بدون تقویت کننده به شکست نسبتاً ترد، تبدیل شده است. دلیل این امر می‌تواند حضور الیاف کربن و ایجاد مناطق تنش حاصل از اختلاف ضریب انبساط حرارتی الیاف و فاز زمینه باشد که باعث افزایش کار سختی و کاهش شکل‌پذیری می‌شود که پیش‌تر به آن اشاره شد. باید توجه داشت که در مواد مرکب زمینه فلزی تقویت شده با الیاف، ترک اصلی ممکن است یک لیف را به سه حالت مختلف شکسته و از آن عبور کند [14].

(1) در صورت اتصال قوی بین زمینه و الیاف، ممکن است ترک پشت لیف متوقف و با افزایش انرژی ترک، لیف بریده شده و ترک از آن عبور کند.
(2) در صورت عدم وجود اتصال بسیار قوی بین زمینه و تقویت کننده ترک ممکن است در جهت لیف انتشار یافته و نهایتاً آن را از زمینه بیرون بکشد.
(3) در صورت عدم وجود اتصال قوی بین زمینه و تقویت کننده و اعمال بار در جهت‌های نزدیک به عمود بر محور لیف، ترک با رسیدن به یک لیف، آن را دور زده و از کنار آن عبور کند (پل زدن ترک) [23].

سازکارهای بیان شده در بالا به ترتیب بیش‌ترین انرژی جذب شده از نوک ترک را دارند. عموماً هر سه نوع این سازکارها در مقطع شکست نمونه‌های مرکب تقویت شده با الیاف مشاهده می‌شوند اما معمولاً یک یا دو تای از این آن‌ها سازوکار غالب در شکست است. سازوکار غالب توسط شرایط فصل مشترک الیاف و زمینه تعیین می‌شود که در اینجا همان‌طور که در تصاویر مشخص است، بیشتر سازوکار بیرون کشیده شدن الیاف از زمینه و انحراف ترک به همراه دور زدن الیاف است. در نمونه‌ی تقویت شده با دو درصد حجمی الیاف، سازوکار غالب بریده شدن الیاف است و تعداد کمی بیرون کشیده شدن الیاف نیز مشاهده می‌شود. در نمونه‌ی با چهار درصد تقویت کننده تعداد الیاف بیرون کشیده شده افزایش یافته و تعدادی از الیاف در جهت عمود بر محور کشش قرار گرفته‌اند که موجب پل زدن ترک از روی الیاف شده است. در نمونه‌ی با شش درصد حجمی تقویت کننده، با افزایش تعداد الیافی که در جهت عمود بر محور کشش قرار گرفته‌اند سازوکار غالب پل زدن ترک از روی الیاف بوده و تعداد کمی از الیاف نیز بیرون کشیده شده‌اند. این تغییر سازوکار، کاهش تنش شکست نمونه‌ی با شش درصد حجمی تقویت کننده را نسبت به نمونه‌ی با چهار درصد حجمی تقویت کننده توجیه می‌کند زیرا این سازوکار انرژی بسیار کم‌تری از ترک را جذب می‌نماید. در مورد نمونه‌ی با هشت درصد تقویت کننده سازوکار غالب پل زدن الیاف و بیرون کشیدگی آن‌هاست اما به دلیل وجود مناطق آگلومره شده‌ی الیاف کربن در این نمونه، افت تنش شکست بسیار بیش‌تری اتفاق افتاده است.

5-4- نتایج شکست نگاری

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از مقطع شکست نمونه‌ها در شکل‌های 34 تا 38 آورده شده است.

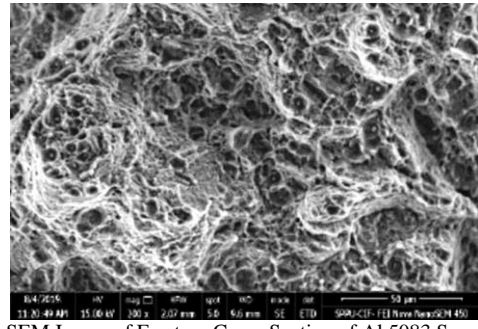


Fig. 34 SEM Image of Fracture Cross-Section of Al 5083 Sample

شکل 34 تصویر SEM از مقطع شکست نمونه‌ی Al 5083

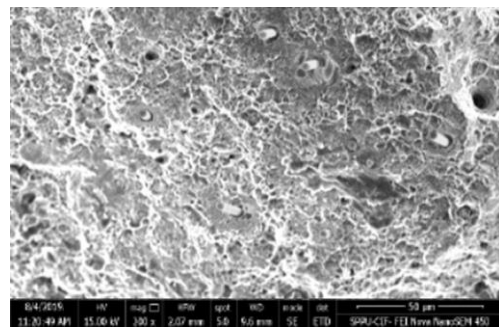


Fig. 35 SEM Image of Fracture Cross-Section of Al 5083-2% vol C_{sf} Sample

شکل 35 تصویر SEM از مقطع شکست نمونه‌ی Al 5083- 2% vol C_{sf}

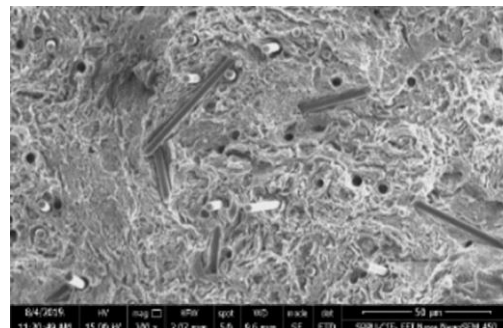


Fig. 36 SEM Image of Fracture Cross-Section of Al 5083-4% vol C_{sf} Sample

شکل 36 تصویر SEM از مقطع شکست نمونه‌ی Al 5083- 4% vol C_{sf}

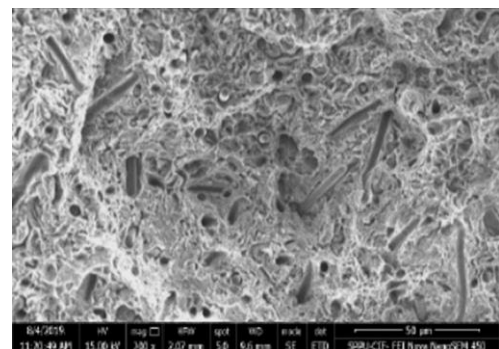


Fig. 37 SEM Image of Fracture Cross-Section of Al 5083-6% vol C_{sf} Sample

شکل 37 تصویر SEM از مقطع شکست نمونه‌ی Al 5083- 6% vol C_{sf}

5- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

سازوکار شکست بیرون کشیدگی و پل زدن ترک از روی الیاف تشخیص داده شد.

(1) می‌توان آسیاب‌های کم انرژی را به منظور اختلاط پودر زمینه و تقویت کننده به جای آسیاب‌های پراثرتری که در پژوهش‌های پیشین استفاده شده است، بکار برد.

(2) زمان موردنیاز برای اختلاط مناسب پودر فلز زمینه با تقویت کننده‌ی الیافی با افزایش درصد تقویت کننده از دو تا هشت درصد، از دو ساعت تا 28 ساعت افزایش یافت.

(3) استفاده از تقویت کننده‌ی الیافی می‌تواند از رشد افراطی دانه‌ها طی فرایند پرس گرم جلوگیری کند.

(4) با استفاده از روش پرس گرم می‌توان نمونه‌های مرکب تقویت شده با الیاف را تا چهار درصد حجمی تقویت کننده با توزیع یکنواخت الیاف در زمینه تولید کرد.

(5) با افزایش درصد تقویت کننده چگالی نسبی نمونه‌های مرکب به دلیل تشکیل مناطق آگلومره شده‌ی الیاف تقویت کننده، از 99.1 به 96.6 کاهش یافت.

(6) با افزایش فاز تقویت کننده تا دو درصد حجمی سختی ویکرز از 82.1 به 102.5 افزایش و تا چهار درصد حجمی تقویت کننده با رسیدن به عدد 101.6 تقریباً روند خطی داشته است و با افزایش درصد تقویت کننده به بیش از چهار درصد، به دلیل تشکیل الیاف تقویت کننده آگلومره شده سختی کاهش یافته است به طوری که سختی نمونه‌ی مرکب با شش درصد حجمی تقویت کننده به 88.8 و در نمونه‌ی با هشت درصد حجمی تقویت کننده به عدد 83.6 رسید.

(7) تنش کشش نهایی نمونه‌های مرکب با افزایش درصد تقویت کننده تا چهار درصد حجمی از 214.49 MPa به 400.47 MPa افزایش و پس از آن به دلیل تشکیل مناطق آگلومره شده‌ی الیاف تقویت کننده، به شدت کاهش یافت.

(8) درصد ازدیاد طول نمونه‌های کشش با افزایش درصد تقویت کننده به دلیل ممانعت الیاف از تغییر شکل موم‌سان زمینه از 8.19 به 2.23 کاهش یافت.

(9) تنش خمشی نمونه‌ها مشابه تنش کششی نهایی با افزایش درصد تقویت کننده تا چهار درصد حجمی از 354.98 MPa تا 423.77 MPa افزایش و پس از آن به دلیل تشکیل مناطق آگلومره شده‌ی الیاف تقویت کننده، تا 283.67 MPa کاهش یافت.

(10) تغییر شکل نمونه‌ها تحت خمش با افزایش درصد تقویت کننده به دلیل ممانعت الیاف از تغییر شکل موم‌سان زمینه، از 1.11 mm به 0.41 mm کاهش یافت.

(11) شکست نمونه‌ها با افزایش درصد تقویت کننده به دلیل ممانعت الیاف از تغییر شکل موم‌سان زمینه، از شکست نرم به شکست نسبتاً ترد تغییر پیدا کرد.

(12) با افزایش درصد تقویت کننده عمق و تعداد دیمپل‌ها کاهش یافت.

(13) سازوکار شکست در نمونه‌ی با دو درصد حجمی تقویت کننده بریده شدن الیاف و تعداد کمی بیرون کشیده شدن الیاف، در نمونه‌ی با چهار درصد حجمی تقویت کننده بیرون کشیدگی و پل زدن ترک از روی الیاف، در نمونه‌ی با شش درصد حجمی تقویت کننده پل زدن ترک از روی الیاف و تعداد کمی بیرون کشیده شدن الیاف و درمورد نمونه‌ی با هشت درصد حجمی تقویت کننده وجود مناطق گسترده‌ی آگلومره شده‌ی الیاف مشاهده و

6- منابع

- [1] Chawla, N. and Chawla, K.K., "Metal Matrix Composites," Springer Science, 1st Edition, 2006.
- [2] Guo, X. and Derby, B., "Solid state fabrication and interfaces of fiber reinforced metal matrix composites," Progress in Materials Science, Vol. 39, p.p. 411-495, 1995.
- [3] Kainer, K.U., "Basics of Metal Matrix Composites," Metal Matrix Composites, WILEY-VCH Verlag GmbH, 1st Edition, pp.1-54, 2006.
- [4] Composite Materials Handbook, Department of Defense United State of America, Vol. 4, MIL-HDBK-17-3E, 2002.
- [5] Nishida, Y., "Fabrication and recycling of aluminum metal matrix composites," Metal and Ceramic Matrix Composites, Institute of Physics Publishing Bristol and Philadelphia, 2nd Edition, 2004.
- [6] Miracle, D.B., "Metal matrix composites - From science to technological significance," Composites Science and Technology, Vol. 65, p.p. 2526-2540, 2005.
- [7] Akhlaghi, F., "Composites," Booklet of M.Sc., 2005.
- [8] German, R.M., "Powder Metallurgy Science", University of Minnesota, 2nd Edition, pp. 45- 83, 1984.
- [9] Lenel, F.V., "Powder Metallurgy: principles and application," Metal powder industries federation, 2nd Edition, 1980.
- [10] Mortensen, A., SanMarchi, C., Degischer, H.P., "Glossary of terms specific to Metal Matrix Composites," MMC-Assess Consortium, pp. 1-22, AC 20-107A, 2000.
- [11] Hort, N., Kainer, K.U., "Powder Metallurgic ally Manufactured Metal Matrix Composites," Metal Matrix Composites, WILEY-VCH Verlag GmbH, 1st Edition, pp.1-54, 2006.
- [12] Okura, A., Motoki, K., "Rate of Formation of Intermetallic Compounds in Aluminum Matrix-Carbon Fiber Composites," Composites Science and Technology, Vol. 24, pp. 243-252, 1985.
- [13] Tang, Y., Liu, L., Li, W., Shen, B., Hu, W., "Interface characteristics and mechanical properties of short carbon fibers/Al composites with different coatings," Applied Surface Science, Vol. 255, pp. 4393-4400, 2009.
- [14] BhavSingha, B., Balasubramanianb, M., "Processing and properties of copper-coated carbon fiber reinforced aluminum alloy composites," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 209, pp. 2104-2110, 2009.
- [15] Jafari, R., "Production and Characterization of Carbon Fiber-Reinforced Aluminum Alloy Composites," In Persian, Faculty of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Master's Thesis, IRAN, 2014.
- [16] Deshpande, M., Gondil, R., Murty, S. N., & Kalal, R. K., "Studies on 7075 aluminum alloy MMCs with milled carbon fibers as reinforcements. Transactions of the Indian Institute of Metals", 71, pp. 993-1002, 2018.
- [17] Kumar, N., Chittappa, H. C., & Vannan, S. E., "Development of aluminium-nickel coated short carbon fiber metal matrix composites", Materials Today: Proceedings, 5(5), pp. 11336-11345, 2018.
- [18] Rams, J., Uren, A., Escalera, M.D., Sanchez M., "Electroless nickel coated short carbon fibres in aluminum matrix composites," Composites: Part A, Vol. 38, pp. 566-575, 2007.
- [19] Sanchez, M., Rams, J., Urena, A., " Fabrication of aluminum composites reinforced with carbon fibres by a centrifugal infiltration process," Composites: Part A, Vol. 41, pp. 1605-1611, 2010.
- [20] Tavousi, M., "Performance of Al2O3-TiB2/Fe Reinforcements in Aluminum Matrix Composites," In Persian, Scientific Research Journal of Advanced Materials in Engineering, Vol. 36, No. 1, pp. 23-38, 2016.
- [21] Rezavi Tousi, S. S., "Modeling the Effect of Alumina Nanoparticle Distribution on Grain Growth in Nanostructured Composites," In Persian, 7th Congress of Iranian Ceramics, 2009.

- [22] Mandal, D., Dutta, B.K, Panichra, C.S., "Effect of copper and nickel coating on short steel fiber reinforcement on microstructure and mechanical properties of aluminum matrix composites," *Materials Science and Engineering*, Vol 492, pp. 346–352, 2008.
- [23] Matheus, R. D. and Rawlings, L. F., "Science and Engineering of Composite Materials," In Persian, 1st Edition, Translated by Shokouhfar, A., Haddad Sabzevari, M., Hayerian Ardekani A., Ferdowsi University of Mashhad Publications, 2005.