جلد 7، شماره 3، پاییز 99، ص‌ص 981-988

شریه علمی پژوهشی

علوم و فناوری **کامپوزیـــت**

http://jstc.iust.ac.ir

بررسی رفتار خمشی چندلایه‌های الیاف/ فلز حاوی الیاف شیشه و کولار بعد از سیکل حرارتی

مهدی عبدالهی آذغان[1]، مهرداد فلاح نژاد[2]، امین زمانی[3]، رضا اسلامی فارسانی[1*]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی کرج

3- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی علوم تحقیقات تهران

4- دانشیار، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

* تهران، 19919-43344، eslami@kntu.ac.ir

اطلاعات مقاله:

دریافت: 98/03/28

پذیرش: 99/02/13

کلیدواژگان

کامپوزیت لایه‌ای الیاف- فلز

سیکل حرارتی

لایه‌چینی الیاف

خواص خمشی

چکیده

در این پژوهش، تاثیر چیدمان الیاف و سیکل حرارتی بر رفتار خمشی کامپوزیت‌های لایه‌ای الیاف- فلز (FML) حاوی دو نوع الیاف تقویت کننده (الیاف شیشه و کولار) مورد مطالعه قرار گرفت. نمونه‌های FML متشکل از دو ورق آلومینیوم 2024-T3 و لایه‌ی میانی کامپوزیت زمینه اپوکسی با 3 لایه الیاف شیشه و یک لایه الیاف سه محوره کولار در 2 حالت لایه‌چینی مختلف به روش لایه‌گذاری دستی ساخته شدند. هر سیکل دمایی در مدت زمان 2 دقیقه بین دمای 150- °C و 100 انجام شد. خواص خمشی نمونه‌ها بعد از 20، 40 و 60 سیکل حرارتی مورد ارزیابی قرار گرفت و با نمونه‌های بدون سیکل مقایسه شدند. در نمونه‌های بدون سیکل، بیشترین استحکام و مدول خمشی و انرژی شکست حاصل از آزمایش خمش مربوط به نمونه‌ای بود که الیاف کولار در لایه زیرین کامپوزیت پلیمری و متصل به آلومینیوم قرار داشتند. با اعمال 40 سیکل حرارتی برای نمونه مذکور، مقادیر استحکام و مدول خمشی و انرژی شکست در مقایسه با نمونه بدون سیکل، به ترتیب 8، 9 و 35 درصد افزایش یافتند در حالی که برای نمونه 60 سیکل، این خواص سیر نزولی داشتند. در حالت مشابه برای نمونه‌ای که الیاف شیشه در لایه زیرین کامپوزیت پلیمری قرار داشت، استحکام و مدول خمشی و انرژی شکست در 40 سیکل نسبت به نمونه بدون سیکل به ترتیب 10، 14 و 9 درصد افزایش یافتند، اما مجدداً در 60 سیکل کاهش خواص دیده شد. نتایج این تحقیق همچنین نشان داد که سه مکانیزم پخت ثانویه، تنش فشاری و جدایش بین اجزای FML، عوامل اصلی تغییر خواص خمشی در حین سیکل حرارتی بودند.

Investigation the flexural behavior of fiber metal laminates containing glass and Kevlar fibers subjected to thermal cycling

Mehdi Abdollahi Azghan[1], Mehrdad Fallahnejad[2], Amin Zamani[3], Reza Eslami-Farsani[1*]

1- Faculty of Materials Science and Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
2- Faculty of Mechatronics, Karaj Branch, Islamic Azad University, Alborz, Iran
3- Faculty of Mechanical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
* 19919-43344, Tehran, Iran, eslami@kntu.ac.ir

Keywords

Fiber-metal laminate composite
Thermal cycling
Stacking sequence fibers
Flexural properties

Abstract

In this study, the effects of stacking sequence of fibers and thermal cycling on the flexural behavior of fiber metal laminates (FML) including glass and Kevlar fibers were investigated. The FML samples were fabricated with two aluminum 2024-T3 sheets as metal layers and epoxy matrix composite consisted of 3 layers of glass fibers and one layer of triaxial Kevlar fibers with two stacking sequence of fibers with hand-lay-up method. Each thermal cycle was carried out for 2 min in temperature range of -150 and 100 °C. The FML samples were cycled for 20, 40 and 60 times and their flexural performance was evaluated before and after thermal cycling. The highest values of flexural strength and modulus, and fracture energy were related to sample that Kevlar fibers were the bottom layer of polymer composites. With applying 40 thermal cycles to the mentioned sample, the flexural strength and modulus and fracture energy values were respectively increased to 8, 9 and 35 percent compared to the samples without cycling. While a decreasing trend was observed for samples with 60 cycles compared to the samples with 40 cycles. When the glass fibers were the bottom of polymeric part of FMLs, the flexural strength and modulus and fracture energy values were respectively increased to 10, 14 and 9 percent with applying 40 thermal cycles, compared to sample without thermal cycles,but in 60 cycles, the flexural properties were reduced. Results of this research indicated that post curing of polymer, compressive stress and deboning between components of FML were three main mechanisms for changing the flexural properties of samples during thermal cycling.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Abdollahi Azghan, M. Fallahnejad, M .Zamani, A and .Eslami-Farsani, R.“Investigation the flexural behavior of fiber metal laminates containing glass and Kevlar fibers subjected to thermal cycling”, In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 3, pp. 981-988, 2020.

1- مقدمه

توسعه و تحقیق در زمینه مواد جدید مانند کامپوزیت‌ها یکی از زمینه‌های تحقیقاتی در شاخه مهندسی است که علت آن رفتار مکانیکی مناسب آن‌ها می‌باشد. کامپوزیت‌های زمینه پلیمری از خواص خستگی، استحکام و سفتی بالا برخوردارند، اما مقاومت در برابر سایش و ضربه پایین یکی از اساسی‌ترین مشکلات این نوع کامپوزیت‌ها محسوب می‌شود. مهندسان در دانشگاه دلفت به منظور بهبود خواص سایشی و ضربه کامپوزیت‌های پلیمری از ورق‌های فلزی استفاده کردند و کامپوزیت‌های لایه‌ای الیاف- فلز (FML[1]) را ساختند. استفاده از کامپوزیت‌های پلیمری و ورق فلزی در کنار هم باعث ترکیب خواص آن‌ها شده و موادی با خواص مکانیکی عالی را فراهم می‌کنند [2,1]. کامپوزیت‌های FML، ساختارهای کامپوزیتی هیبریدی بر پایه ورق‌های نازک از آلیاژهای فلزی (آلیاژهای آلومینیوم، تیتانیم، منیزیم و فولاد) و کامپوزیت-های پلیمری تقویت‌شده با الیاف هستند [4,3]. آلومینیوم‌های آلیاژی به دلیل خواص مکانیکی خوب از قبیل چقرمگی شکست بالا، استحکام مناسب، چگالی پایین و ارزان بودن، استفاده بیش‌تری نسبت به دیگر آلیاژها دارند [5,2].

کامپوزیت‌های FML به صورت کلی شامل سه نوع GLARE[2]، ARALL[3] و CARALL[4] هستند. GLARE در ساخت بدنه بالایی هواپیمای A380، به علت سبکی و صرفه‌جویی در سوخت، بکار می‌رود. ARALL به علت مقاومت به ضربه بالا در ساخت درب بوئینگ C-17 و CARALL به علت سختی و استحکام بالا عمدتا در بدنه هلیکوپتر و سازه-های هواپیمایی مورد استفاده قرار می‌گیرند [6].

در کامپوزیت‌ها، یک یا چند مکانیزم شکست مانند ترک خوردگی زمینه، تورق زمینه، جدایش در فصل مشترک، شکست الیاف و بیرون کشیدگی آن می‌تواند باعث شکست در این نوع مواد شود. در کامپوزیت‌های FML به دلیل اثر پل‌زنی، الیاف نسبت به شروع و رشد ترک مقاوم هستند. در حالی‌که فصل مشترک بین ورق فلزی و کامپوزیت پلیمری نقش مهمی در خواص مکانیکی این نوع کامپوزیت‌ها دارد [8, 7]. به منظور افزایش چسبندگی بین ورق فلزی و کامپوزیت پلیمری از روش‌های مختلفی نظیر بکارگیری چسب، اصلاح مکانیکی، شیمیایی و الکتروشیمیایی استفاده می‌کنند. استفاده از ترموپلاست‌ها مانند پلی اتر ایمید[5] به عنوان چسب، افزایش چسبندگی بین کامپوزیت پلیمری و ورق فلزی را به دنبال دارد، ولی باعث کاهش چقرمگی و استحکام خستگی کامپوزیت FML می‌شود [9]. عملیات مکانیکی به منظور حذف لایه اکسیدی روی سطح آلومینیوم انجام می‌گیرد و باعث ایجاد یک سطح زبر با اندازه تخلخل‌های ماکرو می‌شود که بعد از چند دقیقه لایه اکسیدی دوباره تشکیل می‌شود. عملیات شیمیایی به منظور چربی‌زدایی و حذف لایه اکسیدی ضعیفی که روی سطح آلومینیوم قرار دارد، انجام می-پذیرد. عملیات الکتروشیمیایی نیز یک لایه اکسیدی روی سطح آلومینیوم ایجاد می‌کند که شامل میزان زیادی از تخلخل در مقیاس میکرو است [10].

سیکل دمایی یکی از عوامل محیطی مخرب در تغییر خواص مکانیکی تجهیزات به حساب می‌آید. به عنوان مثال ایستگاه فضایی در طول 30 سال عمر مفید خود باید 175000 سیکل دمایی بین 125- °C و 125 °C را تحمل کند [11]. سیکل‌های دمایی با استفاده از چند نوع مکانیزم باعث تغییر در خواص مکانیکی کامپوزیت‌های پلیمری می‌شوند. ایجاد تنش پسماند در اثر تغییر ناگهانی دما در دماهای پایین [12]، پیری فیزیکی (که حجم آزاد و متحرک مولکول‌های پلیمر اپوکسی را کاهش می‌دهند) [13] و همچنین پخت ثانویه در پلیمرها (که باعث افزایش اتصالات عرضی می‌شود) [1]، افزایش استحکام و مدول در پلیمر و در نتیجه کامپوزیت زمینه پلیمری را به همراه دارد. جدایش بین اجزای کامپوزیت در اثر تفاوت در ضریب انبساط/ انقباض حرارتی باعث کاهش اتصال بین اجزای کامپوزیت پلیمری شده و خواص مکانیکی را کاهش می‌دهد [14].

عبدالهی و همکاران [2] تاثیر سیکل حرارتی و اصلاح سطحی آلومینیوم روی خواص خمشی کامپوزیت‌های FML را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند، سیکل حرارتی، استحکام خمشی FML با آلومینیوم اصلاح سطحی شده به روش شیمیایی (حکاکی شده) را کاهش می‌دهد. در حالی‌که برای FML با آلومینیوم اصلاح سطحی شده به روش الکتروشیمیایی (آندایز شده)، استحکام خمشی در اثر سیکل حرارتی ابتدا افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد. آن‌ها علت این افزایش را بهبود اتصالات عرضی پلیمر و علت کاهش را جدایش بین اجزای FML گزارش کردند.

کاستا و همکاران [15]، تاثیر سیکل حرارتی را بر خواص کششی و برشی کامپوزیت‌های FML مورد بررسی قرار دادند. همچنین به منظور افزایش چسبندگی بین ورق‌های آلومینیوم و کامپوزیت پلیمری از دو لایه پلیمر ترموپلاست استفاده کردند. سپس نمونه‌ها را تحت سیکل حرارتی بین دماهای 50- ^{o}C تا 80 با تعداد 1000 و 2000 سیکل قرار دادند. نتایج تحقیق، تغییرات زیادی را در خواص کششی و برشی نسبت به نمونه بدون سیکل نشان ندادند.

فرهان نور و همکاران [16] تاثیر سیکل گرمایشی بین دو دمای 65- ^{o}C و 70 را بر خواص کششی کامپوزیت‌های FML حاوی الیاف کربن مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها مشاهده کردند، خواص کششی در ابتدا افزایش و سپس کاهش یافت که علت افزایش اولیه را پخت ثانویه پلیمر اعلام کردند.

مین ژوا [17] تاثیر تغییر دامنه دمایی سیکل گرمایشی را بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های FML مورد مطالعه قرار داد. نتایج نشان داد، افزایش دامنه دمایی ابتدا باعث افزایش و سپس کاهش خواص مکانیکی این نوع کامپوزیت‌ها می‌شود که علت افزایش، پخت ثانویه پلیمر و علت کاهش خواص مکانیکی به وجود آمدن میکروترک‌ها در فصل مشترک کامپوزیت پلیمری و ورق آلومینیومی است.

در پژوهشی، نجفی و همکاران [18] تاثیر نانوذرات رس را روی سیکل پیرسازی سرمایشی کامپوزیت‌های GLARE مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاصل از آزمون خمش و ضربه نشان داد، افزودن نانوذرات رس شیب کاهش خواص مکانیکی را کمتر می‌کند.

ری [19]، تاثیر محیط گرم و سرد را بر خواص برشی کامپوزیت پلیمری حاوی الیاف شیشه مورد مطالعه قرار داد. نتایج نشان داد، محیط گرم و سرد به علت تفاوت در ضریب انبساط حرارتی اجزای تشکیل دهنده باعث افزایش چسبندگی بین اجزای کامپوزیت شده و در نتیجه استحکام برشی نیز افزایش می‌یابد.

اسلامی فارسانی و همکاران [20]، تاثیر سیکل حرارتی بر خواص سختی و ضربه کامپوزیت پلیمری حاوی الیاف کربن و بازالت را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها مشاهده کردند، افزایش سیکل حرارتی، سختی سطح و مقاومت

[1] Fiber Metal Laminate
[2] Aramide Reinforced Aluminum Laminate
[3] Glass Laminate Aluminum Reinforced Epoxy
[4] Carbon Reinforced Aluminum Laminate
[5] Polyetherimide

به ضربه کامپوزیت را کاهش می‌دهد. این کاهش در سختی سطح برای کامپوزیت‌های حاوی الیاف بازالت و کربن نسبت به نمونه‌های حاوی الیاف کربن یا الیاف بازالت کمتر بوده و پایداری حرارتی بیشتری را نشان می‌دهد. اما کاهش استحکام ضربه در نمونه‌های حاوی الیاف کربن و بازالت نسبت به نمونه‌های حاوی الیاف کربن یا بازالت با شیب بیشتری بوده است.

لاوکوک و همکاران [21]، تاثیر چسبندگی اتصال بین آلومینیوم و کامپوزیت پیش‌آغشته را بر خواص مکانیکی چندلایه‌های الیاف/ فلز تقویت شده با الیاف کربن مطالعه کردند. نتایج نشان داد، خواص مکانیکی از جمله استحکام و مدول کششی نمونه با آلومینیوم اصلاح سطحی شده نسبت به نمونه با آلومینیوم بدون اصلاح سطحی بالاتر است. همچنین استحکام برشی بین‌لایه‌ای در چندلایه‌های الیاف/ فلز بدون اصلاح سطحی آلومینیوم، تحت آزمون‌های خمش سه نقطه و پنج نقطه حدود 10 درصد کمتر از نمونه با آلومینیوم اصلاح سطحی شده بود.

تاکنون تحقیقات بسیار کمی مبنی تاثیر سیکل حرارتی در دو نوع سرمایش و گرمایش به طور هم‌زمان روی خواص خمشی کامپوزیت‌های لایه‌ای الیاف- فلز انجام شده است. هدف از این پژوهش، بررسی تاثیر سیکل حرارتی و نوع چیدمان الیاف بر رفتار خمشی کامپوزیت FML شامل ورق‌های آلومینیوم 2024-T3 و کامپوزیت زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف هیبریدی کولار و شیشه می‌باشد. در کامپوزیت‌های FML مذکور، لایه‌های فلزی به منظور افزایش چسبندگی کامپوزیت پلیمری و ورق فلزی، اصلاح سطحی شدند. بر این اساس، نوآوری تحقیق حاضر نسبت به تحقیقات پیشین، بررسی تاثیر اصلاح سطحی آلومینیوم، نوع چیدمان الیاف و سیکل حرارتی بر خواص خمشی FML و همچنین بررسی رفتار فصل مشترک آن می‌باشد.

2- بخش تجربی

2-1- مواد

در تحقیق حاضر، رزین اپوکسی R505 و هاردنر H513 (تولید شرکت مهندسی مواد آلی البرز) به عنوان زمینه کامپوزیت استفاده شد. براساس اطلاعات فنی ارائه شده توسط شرکت تولید کننده، در دمای 25 °C، گران-روی این رزین 150-120 پواز و چگالی آن 1.1 g/ml است. این رزین، بعد از عمل پخت، خواص مکانیکی، چسبندگی و مقاومت شیمیایی خوبی از خود نشان می‌دهد، به طوری‌که استحکام کششی آن به 85 MPa و دمای تخریب رزین (که در آن زنجیره‌های پلیمری شروع به شکستن می‌کنند) به 110 °C می‌رسد. الیاف شیشه نوع E، با چگالی سطحی 400 g/m^2 به صورت تک جهته ریزبافت (محصول شرکت متیکس[1] ترکیه) و پارچه الیاف کولار به صورت سه محوره[2] با زوایای [-45,0,+45] با چگالی سطحی 300 g/cm^2 (ساخت شرکت توارون[3]) به عنوان تقویت‌کننده و آلومینیوم 2024-T3 با ضخامت 0.5 mm به عنوان لایه فلزی برای ساخت FML مورد استفاده قرار گرفتند.

2-2- اصلاح سطحی آلومینیوم 2024-T3

قبل از لایه‌گذاری کامپوزیت، به منظور بهبود چسبندگی سطحی بین آلیاژ آلومینیوم و کامپوزیت پلیمری، عملیات آماده‌سازی سطحی شیمیایی FPL[4] روی ورق‌های آلومینیوم انجام گرفت. بدین منظور، در ابتدا سطح ورق آلومینیوم با استون پاک شده و سپس در محلول هیدروکسید سدیم غوطه‌ور و پس از آن با آب مقطر شستشو داده شد. در مرحله بعد، ورق آلومینیوم در محلول سدیم دی‌کرومات و اسید سولفوریک (مطابق با استاندارد ASTM D2674) غوطه‌ور شد و در نهایت با آب مقطر تحت شستشو قرار گرفت.

2-3- چیدمان الیاف کولار و شیشه در ساختار FML

به منظور بررسی تاثیر چیدمان تقویت کننده بر خواص خمشی کامپوزیت‌های FML، سه لایه الیاف شیشه و یک لایه الیاف سه محوره کولار با دو چیدمان مختلف مورد استفاده قرار گرفتند. یکی از چیدمان‌ها شامل سه لایه الیاف شیشه در هنگام آزمون خمش در لایه پایینی (KG FML) و در چیدمان دیگر، سه لایه الیاف شیشه در لایه بالایی (GK FML) بود.

2-4- ساخت نمونه‌ها

به منظور ساخت نمونه‌های FML، ابتدا رزین و هاردنر با نسبت وزنی 100 به 13 (به توصیه شرکت سازنده) با یکدیگر مخلوط شده و به مدت 5 دقیقه هم زده شدند. سپس مخلوط بدست آمده به عنوان زمینه همراه با سه لایه الیاف شیشه و یک لایه الیاف کولار در دو نوع چیدمان متفاوت با روش لایه‌گذاری دستی برای ساخت کامپوزیت بین دو ورق آلومینیوم 2024-T3 قرار داده شدند. در نهایت به منظور پخت نهایی، نمونه‌ها در دمای 30 ºC به مدت 7 روز قرار گرفتند. به منظور آزمون خمش نیز نمونه‌ها با دستگاه واترجت بریده شدند.

2-5- سیکل حرارتی نمونه‌ها

جهت انجام سیکل حرارتی، ابتدا نمونه‌های FML در محفظه نیتروژن مایع از دمای اتاق با نرخ سرمایش 1.7 ºC/s تا دمای 150- ºC رسیدند و به منظور همسان سازی دما در تمامی قسمت‌های نمونه، به مدت 30 s در این دما حفظ شدند. سپس نمونه‌ها از محفظه مذکور خارج شده و در آون با نرخ تقریبی 1.7+ ºC/s به دمای 100 ºC رسانده شده و به مدت 30 s در این دما نگه‌داشته شدند. این سیکل سرمایشی با تعداد 20، 40 و 60 سیکل تکرار شد. به منظور افزایش دقت در اندازه‌گیری دقیق دمای نمونه‌ها از ترموکوپل مدل USB-4718 شرکت ادونتیچ[5] با نرم افزار کامپیوتری دیتالاگر[6] متصل به آن (به منظور نمایش دما با دقت 0.01 ºC) استفاده شد. شکل 1، تجهیزات مورد استفاده برای انجام سیکل حرارتی را نشان می‌دهد.

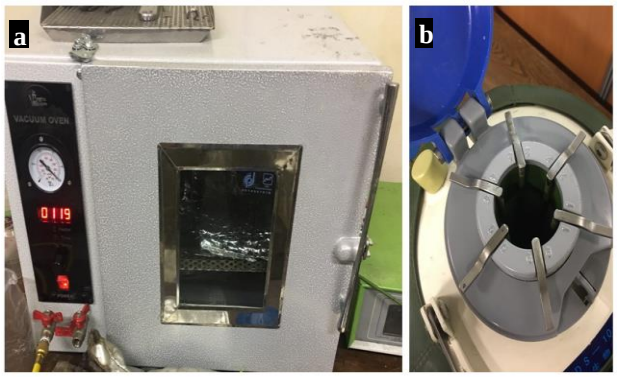


Fig. 1 Thermal cycling setup including, a) oven, b) liquid nitrogen chamber

شکل 1 تجهیزات سیکل حرارتی شامل، a) آون، b) محفظه نیتروژن مایع

[1] Metyx
[2] Triaxial
[3] Twaron
[4] Forest Products Laboratory
[5] Advantech
[6] Data logger

2-6- آزمایش مکانیکی

به منظور انجام آزمایش خمش سه نقطه‌ای، دستگاه خمش هانسفیلد[1] مدل H25KS بکار رفت. در آزمایش خمش سه نقطه‌ای، طبق استاندارد ASTM D790 [22]، نمونه‌ها با ابعاد $130\times25\ mm^2$ و در فاصله 16 میلی‌متری بین دو تکیه‌گاه تحت بارگذاری با نرخ بارگذاری 1.5 mm/min در دمای محیط قرار گرفتند. نمودار نیروی خمشی برحسب جابجایی محوری توسط دستگاه رسم شد و از آن برای تحلیل خواص خمشی استفاده شد. حداقل تکرار انجام آزمایش خمش سه نقطه‌ای برای هر گروه از نمونه‌ها 3 بار بود که داده‌های گزارش شده میانگین آزمایش‌های انجام شده است.

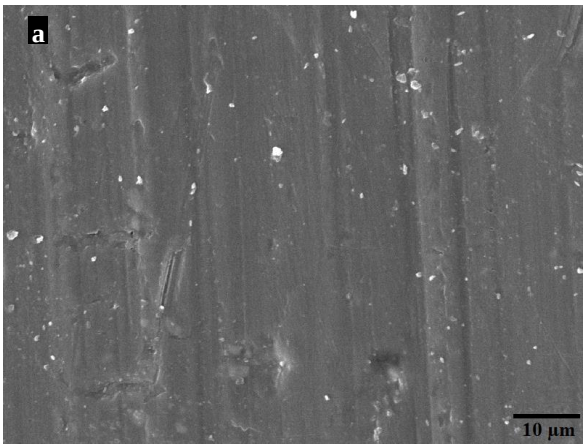
2-7- بررسی میکروسکوپی نمونه‌ها

به منظور مطالعه سطح آلومینیوم اصلاح سطحی شده، مشخص کردن علت تفاوت در نوع مکانیزم‌های شکست و فصل مشترک ورق آلومینیوم و کامپوزیت پلیمری، میکروسکوپ الکترونی روبشی[2](SEM) مدل سایرون[3] AIS- 2100 بکار گرفته شد.

3- نتایج و بحث

3-1- بررسی اصلاح سطحی ورق آلومینیوم

به منظور بررسی تاثیر عملیات سطحی از میکروسکوپ SEM استفاده شد. شکل 2، تصویر میکروسکوپی سطح آلومینیوم قبل و بعد از اصلاح سطحی را نشان می‌دهند. میزان تخلخل در آلومینیوم اصلاح سطحی شده (شکل 2-ب) نسبت به آلومینیوم بدون اصلاح سطحی (شکل 2-الف) در یک سطح مشخص بیشتر می‌باشد. بنابراین اصلاح سطحی باعث ایجاد دو تغییر در سطح آلومینیوم شده است. یکی افزایش سطح آلومینیوم که افزایش سطح تماس بین آلومینیوم و کامپوزیت پلیمری را به همراه دارد و دیگری ایجاد حفرات در سطح آلومینیوم که نفوذ پلیمر در این حفرات باعث ایجاد قفل مکانیکی بین آلومینیوم و کامپوزیت پلیمری می‌شود. این عوامل باعث افزایش چسبندگی بین کامپوزیت پلیمری و ورق آلومینیوم شده و انتقال بار بهتر صورت می‌گیرد، لذا خواص مکانیکی بهبود می‌یابند.



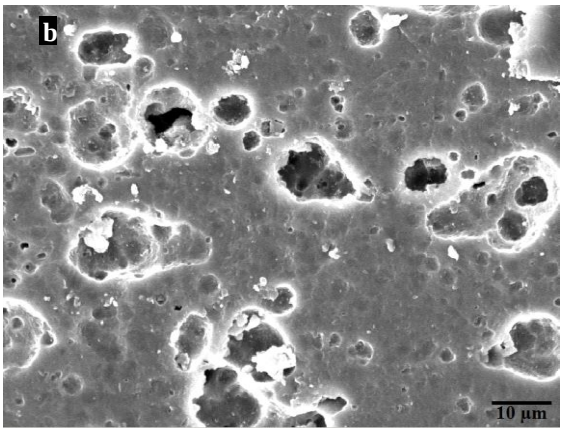


Fig. 2 SEM image of aluminium surface, a) before, b) after FPL surface modification

شکل 2 تصویر SEM از سطح آلومینیوم،a) قبل، b) بعد از اصلاح سطحی FPL

3-2- بررسی فصل مشترک ورق آلومینیوم و کامپوزیت پلیمری قبل و بعد از سیکل حرارتی

اعمال سیکل حرارتی به علت تفاوت در ضریب انبساط/ انقباض حرارتی کامپوزیت پلیمری و ورق آلومینیوم، احتمال ایجاد و رشد ترک را افزایش می‌دهد. بنابراین به منظور بررسی فصل مشترک کامپوزیت پلیمری و ورق آلومینیوم از میکروسکوپ SEM استفاده شد. شکل 3، سطح آلومینیوم قبل (شکل 3-الف) و بعد (شکل 3-ب) از 60 سیکل حرارتی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که نشان داده شده است، هیچ‌گونه ترکی بین فصل مشترک ورق آلومینیوم و کامپوزیت پلیمری دیده نمی‌شود که نشان دهنده چسبندگی مناسب بین کامپوزیت پلیمری و ورق آلومینیوم است.

3-3- بررسی رفتار خمشی کامپوزیت‌های FML

شکل‌های 4 و 5، به ترتیب تاثیر چیدمان و سیکل حرارتی بر استحکام و مدول خمشی کامپوزیت‌های FML را نشان می‌دهند. در نمونه‌های بدون سیکل، استحکام و مدول خمشی کامپوزیت FML زمانی‌که الیاف کولار در لایه زیرین قرار دارد (GK FML)، به ترتیب 484.5 MPa و 228.8 GPa می‌باشند که نسبت به نمونه KG FML (که الیاف شیشه در لایه زیرین قرار دارد)، به ترتیب 14 و 8 درصد بیشتر است. هنگامی‌که نمونه‌ای تحت خمش قرار می‌گیرد، لایه‌های زیرین تحت کشش بیشتری نسبت به لایه-های بالایی هستند. بنابراین لایه‌های زیرین نقش تعیین کننده‌ای در خواص خمشی کامپوزیت FML ایفا می‌کنند. در نتیجه استحکام و مدول زیاد الیاف کولار نسبت به الیاف شیشه مهم‌ترین عامل استحکام و مدول بالای نمونه‌ی GK FML است.

ترشوندگی نامناسب الیاف کولار در مقایسه با الیاف شیشه و سطح صاف و براق این الیاف به علت ساختار شیمیایی آن [23,24] از عواملی است که می‌تواند چسبندگی بین الیاف کولار و ورق آلومینیوم را تحت شعاع قرار دهد. ترشوندگی و چسبندگی نامناسب باعث عدم اتصال مناسب بین کامپوزیت پلیمری و ورق آلومینیوم شد، در نتیجه انتقال بهتر بار به کامپوزیت پلیمری صورت نمی‌گیرد و باعث کاهش خواص خمشی نمونه می‌شود. در حالی‌که بافت سه محوره الیاف کولار بر این مشکل غلبه کرده و ایجاد تخلخل‌هایی در سطح الیاف کولار را همراه دارد. نفوذ بهتر پلیمر در داخل این تخلخل‌ها نیز باعث چسبندگی بهتر الیاف کولار به ورق فلزی می‌شود.

[1] Hounsfield
[2] Scanning Electron Microscope
[3] Siron

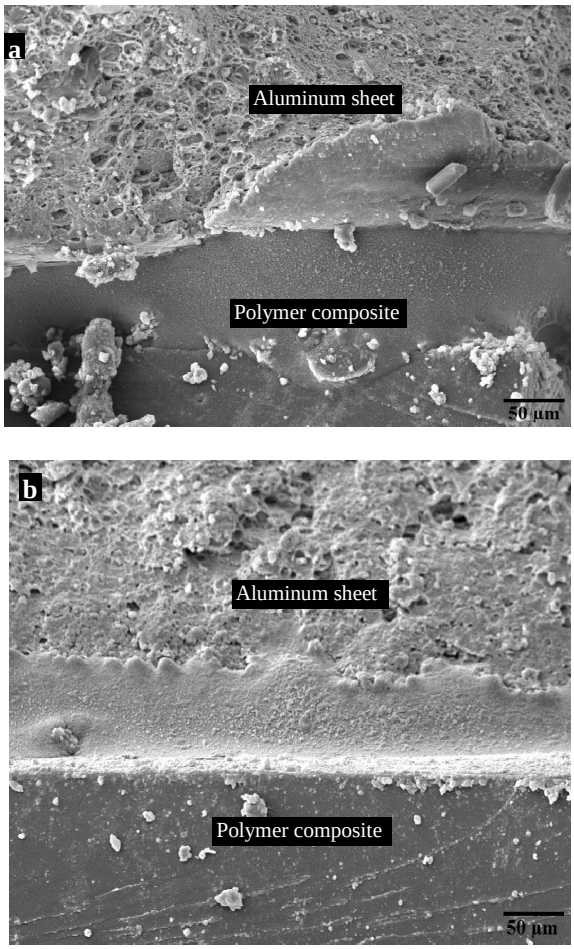


Fig. 3 Intersection of aluminium sheet and polymer composite, a) before, b) after 60 thermal cycling

شکل 3 فصل مشترک ورق الومینیوم و کامپوزیت پلیمری،a) قبل، b) بعد از 60 سیکل حرارتی

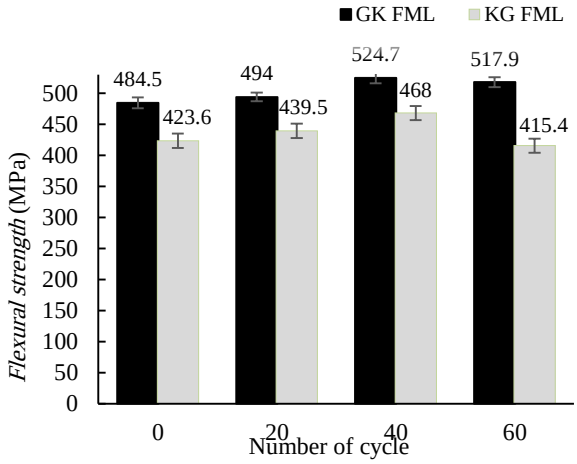


Fig. 4 The effect of stacking sequence of fibers and thermal cycling on the flexural strength of FMLs.

شکل 4 تاثیر چیدمان الیاف و سیکل حرارتی بر استحکام خمشی کامپوزیت-های FML.

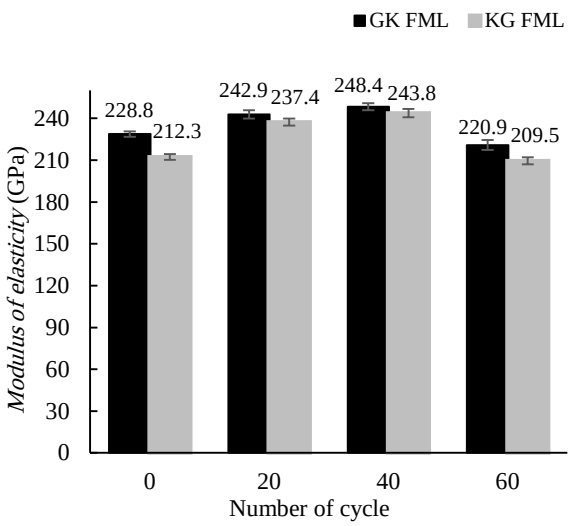


Fig. 5 The effect of stacking sequence of fibers and thermal cycling on the flexural modulus of FMLs

شکل 5 تاثیر چیدمان الیاف و سیکل حرارتی بر مدول خمشی کامپوزیت‌های FML

بعد از اعمال سیکل حرارتی، در نمونه‌های FML با چیدمان‌های مختلف الیاف کولار و شیشه، استحکام و مدول خمشی تمامی نمونه‌های مورد آزمایش ابتدا افزایش و سپس کاهش یافت. در حالت کلی، در حین انجام سیکل حرارتی چند مکانیزم وجود دارد که باعث تغییر در خواص خمشی کامپوزیت‌های FML می‌شوند. ایجاد تنش پسماند فشاری، پخت ثانویه پلیمر و جدایش بین اجزای کامپوزیت، مکانیزم‌هایی هستند که روی خواص خمشی تاثیر می‌گذارند. در این مطالعه، ابتدا تنش پسماند فشاری و پخت ثانویه پلیمر بر جدایش بین اجزای کامپوزیت غلبه کرده و باعث افزایش خواص خمشی در 20 و 40 سیکل شدند. سپس جدایش بین اجزای کامپوزیت به علت تفاوت در ضریب انبساط/ انقباض حرارتی هر یک از اجزای کامپوزیت بر دو مکانیزم دیگر غلبه کرده و باعث کاهش خواص خمشی در 60 سیکل شد. در 20 سیکل حرارتی، در نمونهGK FML، استحکام و مدول خمشی به ترتیب با افزایش 2 و 6 درصدی نسبت به نمونه بدون سیکل GK FML به 494 MPa و 242.9 GPa رسید. همچنین در شرایط مشابه، برای نمونه KG FML، افزایش 4 و 12 درصدی استحکام و مدول خمشی حاصل شد و این خواص به ترتیب، 439.5 MPa و 237.4 GPa بدست آمدند. در 40 سیکل نیز استحکام و مدول خمشی نمونه GK FML روند صعودی از خود نشان داده و به ترتیب با افزایش 6 و 2 درصدی نسبت به نمونه 20 سیکل به 524.7 MPa و 248.4 GPa رسید. برای نمونه KG FML نیز مقادیر 468 MPa و 243.8 GPa به ترتیب برای استحکام و مدول خمشی به ازای 40 سیکل بدست آمد که بیانگر افزایش 6 و 3 درصدی نسبت به نمونه 20 سیکل بود. علت افزایش بیشتر استحکام و مدول خمشی KG FML نسبت به GK FML، اختلاف بیشتر ضریب انبساط حرارتی الیاف کولار با رزین و ورق آلومینیوم در مقایسه با الیاف شیشه است. هر چه میزان تفاوت در ضریب انبساط/ انقباض حرارتی بیشتر باشد، جدایش بین اجزای کامپوزیت تاثیر دو مکانیزم دیگر را کم رنگ‌تر می‌کند.

در 60 سیکل، مکانیزم جدایش بین اجزای کامپوزیت بر تنش فشاری و پخت ثانویه پلیمر غلبه کرده و باعث کاهش قفل مکانیکی بین کامپوزیت پلیمری و ورق فلزی و بین الیاف با زمینه پلیمری می‌شود. همین اتفاق عاملی

برای کاهش خواص خمشی کامپوزیت‌های FML است، بطوری‌که استحکام و مدول خمشی نمونه GK FML در 60 سیکل به ترتیب با کاهش 1 و 11 درصدی نسبت به نمونه 40 سیکل به 517.9 MPa و 220.9 GPa رسیده است. همچنین در شرایط مشابه، در نمونه KG FML نیز استحکام و مدول خمشی به ترتیب 415.4 MPa و 209.5 GPa هستند که نسبت به نمونه40 سیکل کاهش 11 و 14 درصدی داشته‌اند.

شکل 6، انرژی شکست حاصل از آزمون خمش برای نمونه‌های FML را نشان می‌دهد. میزان انرژی شکست برای نمونه GK FML حدود 28 J/mm^3 می‌باشد که نسبت به نمونه بدون سیکل ($20.5\ J/mm^3$)، 27 درصد بیشتر است. بعد از 20 سیکل حرارتی، میزان انرژی شکست GK FML در مقایسه با نمونه بدون سیکل با افزایش 40 درصدی به $39.1\ J/mm^3$ رسید. در شرایط مشابه، انرژی شکست برای نمونه KG FML در 20 سیکل با افزایش 14 درصدی نسبت به نمونه بدون سیکل ($20.5\ J/mm^3$) به 23.4 J/mm^3 می‌رسد. اما در 40 سیکل، انرژی شکست بر خلاف استحکام و مدول خمشی در هر دو نمونه GK FML و KG FML کاهش می‌یابد. در این حالت، انرژی شکست نمونه‌های GK FML و KG FML، با کاهش 4 درصدی به ترتیب به $39.1\ J/mm^3$ و $22.4\ J/mm^3$ رسیده اند که علت آن رفتار ترد کامپوزیت FML و میزان کرنش کم آن در 40 سیکل است. در 60 سیکل نیز این روند ادامه پیدا کرده و انرژی شکست نمونه‌های GK FML و KG FML، به ترتیب به $24\ J/mm^3$ و $21.4\ J/mm^3$ کاهش یافته است.

با توجه به این‌که میزان انرژی شکست از محاسبه سطح زیر منحنی نیرو- جابجایی بدست می‌آید، بنابراین نیرو و جابجایی، هر دو فاکتور مهمی برای محاسبه انرژی شکست می‌باشند. به عنوان مثال، شکل 7 نمودار نیرو- جابجایی را برای 20 سیکل حرارتی نشان می‌دهد. میزان جابجایی و نیروی تحملی وارده در نمونه GK FML (که الیاف کولار در لایه پایینی قرار گرفته است)، نسبت به نمونه KG FML بیشتر است. که علت آن درصد بالای کرنش و استحکام بالای الیاف کولار در مقایسه با الیاف شیشه می‌باشد. به همین دلیل اختلاف زیادی در انرژی شکست بین دو نمونه GK FML و KG FML دیده می‌شود. ولی برای نمونه‌های با تعداد 60 سیکل حرارتی به علت شکست زودرس در اثر جدایش بین اجزای کامپوزیت، میزان اختلاف انرژی شکست بین دو نمونه کمتر است.

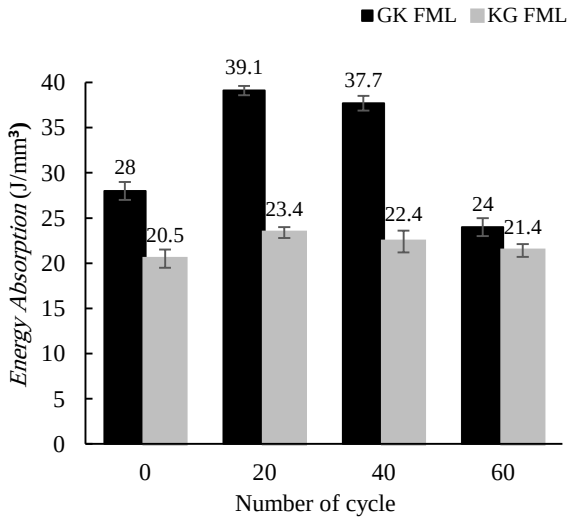


Fig. 6 The effect of stacking sequence of fibers and thermal cycling on the energy absorption of FMLs

شکل 6 تاثیر چیدمان الیاف و سیکل حرارتی بر انرژی شکست کامپوزیت‌های FML

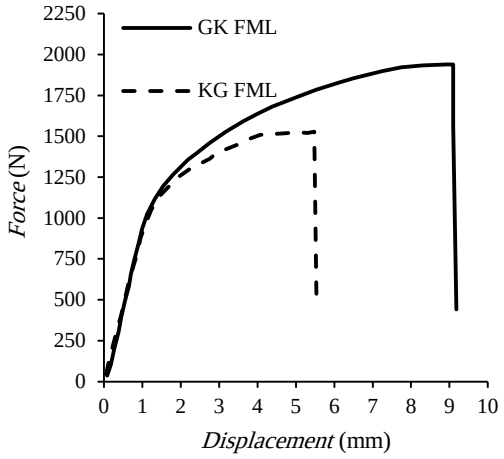


Fig. 7 Force- displacement curve for FMLs with 20 thermal cycles

شکل 7 نمودار نیرو- جابجایی برای نمونه‌های FML با 20 سیکل حرارتی

4-3- بررسی سطوح شکست با چیدمان الیاف مختلف تحت آزمایش خمش

شکل 8، میزان کرنش تمامی نمونه‌های FML را بعد از آزمون خمش را نشان می‌دهد. در تمامی نمونه‌ها، شکست کامپوزیت FML از آلومینیوم رخ می‌دهد که حاصل چسبندگی مناسب کامپوزیت پلیمری و آلومینیوم به علت اصلاح سطحی ورق آلومینیوم است.

همان‌طور که در شکل 8 نشان داده شده است، میزان کرنش نمونه‌های GK FML در تمامی سیکل‌های حرارتی بیشتر از نمونه‌های KG FML است که تحمل بار وارده بیشتر را توسط GK FML نشان می‌دهد. بنابراین خواص خمشی بالاتر در نمونه‌های GK FML مربوط به خواص مناسب الیاف کولار در مقایسه با الیاف شیشه در این نمونه‌هاست.

همچنین میزان کرنش مانند سایر خواص خمشی در هر دو نمونه KG FML و GK FML، ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. علت افزایش میزان کرنش، پخت ثانویه پلیمر و علت کاهش آن، جدایش بین اجرای کامپوزیت است. زمانی‌که انتقال بار از ورق آلومینیوم به کامپوزیت پلیمری بهتر صورت گیرد، نمونه می‌تواند نیروی وارده بیشتری را تحمل کند. بنابراین با افزایش سیکل حرارتی، کاهش چسبندگی بین ورق آلومینیوم و کامپوزیت پلیمری اتفاق می‌افتد که شکست آلومینیوم در تنش‌های پایین را به دنبال دارد.

5-3- مکانیزم شکست در کامپوزیت‌های FML حاوی الیاف مختلف در آزمایش خمش

شکل 9، سطح شکست کامپوزیت پلیمری را نشان می‌دهد. در نمونه بدون سیکل (شکل 9-الف)، مکانیزم شکست ترد الیاف به همراه تخریب زمینه دیده می‌شود. ولی در نمونه 40 سیکل حرارتی (شکل 9-ب)، به دلیل افزایش چسبندگی بین زمینه پلیمری و الیاف در اثر اعمال تنش فشاری حاصل از سیکل حرارتی، شکست ترد الیاف آسیبی به زمینه پلیمری وارد نکرده است. در نتیجه هر چقدر میزان چسبندگی بین الیاف و پلیمر بیشتر باشد، از تخریب زمینه نیز جلوگیری خواهد کرد. این موضوع یکی از عوامل افزایش خواص خمشی نمونه‌های حاوی 20 و 40 سیکل حرارتی در مقایسه با نمونه بدون سیکل است.

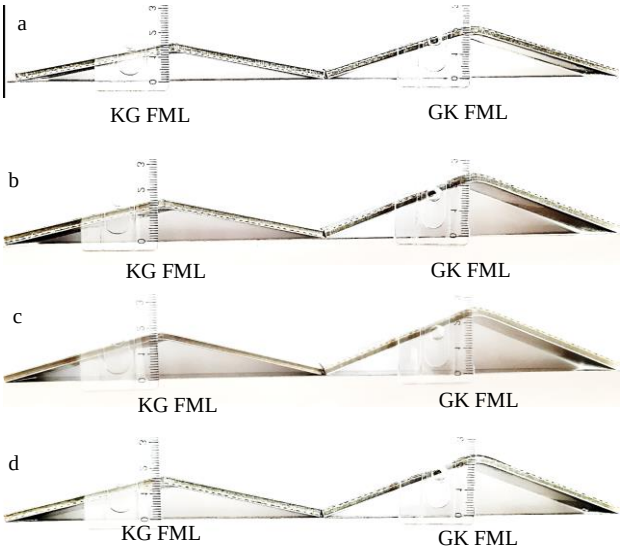


Fig. 8 Strain of FML samples after thermal cycling, a) without cycle, b) 20 cycle, c) 40 cycle, d) 60 cycle.

شکل 8 کرنش نمونه‌های FML بعد از سیکل حرارتی، a) بدون سیکل، b) 20 سیکل، c) 40 سیکل، d) 60 سیکل.

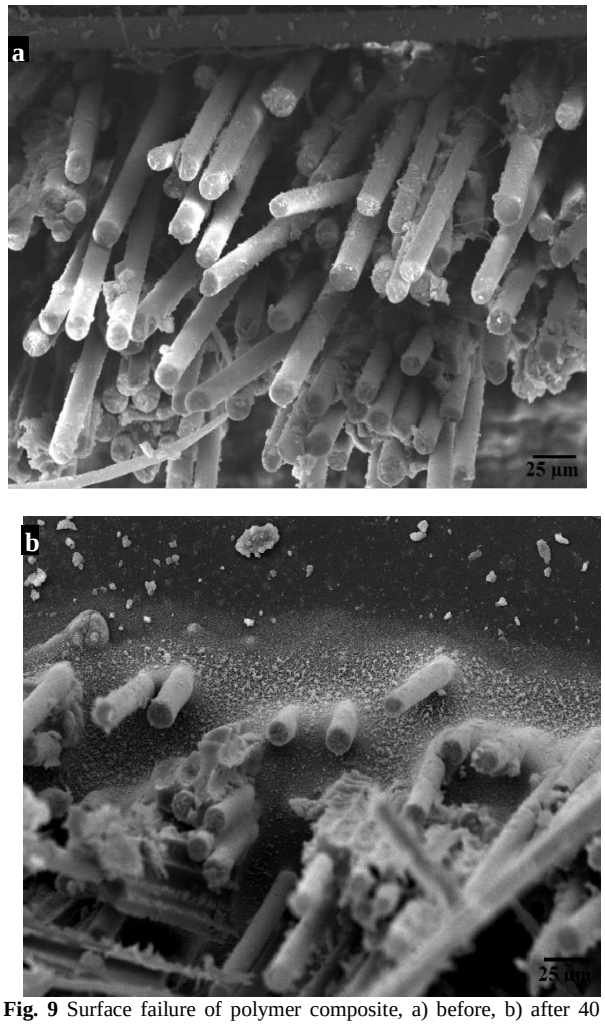


Fig. 9 Surface failure of polymer composite, a) before, b) after 40 thermal cycling

شکل 9 سطح شکست کامپوزیت پلیمری، الف) قبل، ب) بعد از 40 سیکل حرارتی

4- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، تاثیر چیدمان مختلف الیاف و سیکل حرارتی بر کامپوزیت الیاف- فلز شامل ورق‌های آلومینیوم 2024-T3 (اصلاح سطحی شده به روش شیمیایی FPL) و کامپوزیت پلیمری زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف سه محوره کولار و شیشه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نهایی حاصل از این تحقیق به شرح زیر است:

1- اصلاح سطحی آلومینیوم، میزان سطح و حفرات روی سطح آلومینیوم را افزایش می‌دهد. نفوذ پلیمر به داخل این حفرات باعث افزایش چسبندگی بین کامپوزیت پلیمری و آلومینیوم شده و افزایش خواص خمشی را به دنبال دارد.

2- در حالت بدون سیکل حرارتی، زمانی که الیاف کولار در لایه زیرین قرار دارد، کامپوزیت رفتار خمشی بهتری را از خود نشان می‌دهد، به طوری‌که میزان استحکام و مدول خمشی FML، به ترتیب 14 و 8 درصد بیشتر از حالتی است که الیاف شیشه در لایه زیرین قرار دارد.

3- با اعمال سیکل حرارتی، خواص خمشی نمونه‌های FML در 20 و 40 سیکل نسبت به نمونه بدون سیکل افزایش یافت، ولی در 60 سیکل روند کاهشی داشت که علت این تغییرات، رقابت چندین مکانیزم در حین سیکل حرارتی است.

4- در کامپوزیت‌های FML با الیاف هیبریدی، قبل و بعد از سیکل حرارتی، در چیدمانی که الیاف کولار در لایه زیرین قرار دارد و متحمل بار کششی است و الیاف شیشه در لایه بالایی قرار دارد و متحمل بار فشاری است، خواص خمشی بهتری نسبت به چیدمان‌های دیگر حاصل می‌شود.

5- مراجع

[1] Abdollahi Azghan, M. and Eslami-Farsani, R., "Experimental investigation of effect of thermal cycling and metal surface treatment on flexural properties laminate composite of aluminium-epoxy/basalt fibers," In Persian, Modares Mechanical Engineering, Vol. 17, No. 8, pp. 369-376, 2017.

[2] Abdollahi Azghan, M. and Eslami-Farsani, R., "The Effects of Stacking Sequence and Thermal Cycling on the Flexural Properties of Laminate Composites of Aluminium-Epoxy/Basalt-Glass Fibres, Materials Research Express," Vol. 399, No. 1, pp. 25-32, 2018.

[3] Eslami-Farsani, R. Mohabbati, F. and Khosravi, H., "Experimental study of tensile behavior of self-healing fiber-metal laminates composites with chopped hollow glass fibers", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 4, No. 4, pp. 399-404, 2018.

[4] Sadighi, M., Alderliesten, R. and Benedictus, R., "Impact resistance of fiber-metal laminates: a review," International Journal of Impact Engineering, Vol. 49, pp. 77-90, 2012.

[5] Aghamohammadi, H., Hosseini-Abbandanak, S. N., Eslami-Farsani, R., and Siadati, S. M. H., "Effect of various surface treatment methods on the flexural properties of fiber metal laminates," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, 2018.

[6] Nazari, A. Naderi, A.A. Malekzadefard, K. and Hatami, A., "Experimental and numerical analysis of vibration of FML-stiffened circular cylindrical shell under clamp-free boundary condition", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 6, No. 1, pp. 9-20, 2019.

[7] Botelho, E. C., Silva, R. A., Pardini, L. C., Rezende, M. C., "A review on the development and properties of continuous fiber/epoxy/aluminum hybrid composites for aircraft structures," Materials Research, Vol. 9, No. 3, pp. 247-256, 2006.

[8] Ostapiuk, M., Surowska, B. and Bieniaś, J., "Interface analysis of fiber metal laminates," Composite Interfaces, Vol. 21, No. 4, pp. 309-318, 2014.

[9] Marzuki, H. F. A., Mohamad, M., Ubaidillah, E., Ahmadhilmi, E., Nordin, M. N. A, Abidin, Z., Fadzlee, M., Roslani, N., Junos, Y. M. and Omar, S., "Effect of Anodizing on Strength of Carbon-Fibre Aluminium-Laminated Composites," in Proceeding of Trans Tech Publ, vol. 748, pp. 216-221, 2013.

[10] Wang, W. X., Takao, Y., Matsubara, T., "Galvanic corrosion-resistant carbon fiber metal laminates," In Proceeding of The 16th International Conference on Composite Materials, Kyoto, Japan, July 8-13, 2007.
[11] Rawal, S. P. "Metal-Matrix Composites for Space Applications," The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society, Vol. 53, No. 4, pp. 14-17, 2001.
[12] Mahdavi, S., "Thermal Cycling of Out-Of-Autoclave Thermosetting Composite Materials," Thesis, Concordia University, Canada, 2017.
[13] Hagenbeek, M., Müller, B. and Sinke, J., "Effect of Thermal Cycling and Aging on Heated Fiber Metal Laminates and Glass-Fiber Epoxy Composites," Advanced Engineering Materials, pp. 1-10, 2018.
[14] Abdollahi Azghan, M., Arpatapeh, F. A. and Eslami-Farsani, R., "Experimental study of the effect of cryogenic cycling and metal surface treatment on flexural properties of aluminum- epoxy/basalt fibers laminate composite," In Persian, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 4, No. 1, pp. 15-24, 2017.
[15] Da Costa, A. A., Da Silva, D. F., Travessa, D. N. and Botelho, E. C., "The effect of thermal cycles on the mechanical properties of fiber–metal laminates," Materials & Design, Vol. 42, pp. 434-440, 2012.
[16] Noor, M. F., Pasha, R. A., Wakeel, A., Nasir, M. A. and Bilal, Y., "Effect of thermal cycling on the tensile behavior of Cf/Al fiber metal laminates," Advances in Science and Technology Research Journal, Vol. 11, pp. 21-32, 2017.
[17] Zhao, M., Wu, G., Zhu, D., Jiang, L. and Dou, Z., "Effects of thermal cycling on mechanical properties of AlNp/Al composite," Materials Letters, Vol. 58, No. 12-13, pp. 1899-1902, 2004.
[18] Najafi, M., Ansari, R. and Darvizeh, A., "Effect of cryogenic aging on nanophased fiber metal laminates and glass/epoxy composites," Polymer Composites, 2018. doi.org/10.1002/pc.25134.
[19] Ray, B., "Study of the influence of thermal shock on interfacial damage in thermosetting matrix aramid fiber composites," Materials Science Letters, Vol. 22, No. 3, pp. 201-202, 2003.
[20] Eslami-Farsani, R., Khalili, S. M. R. and Najafi, M., "Effect of thermal cycling on hardness and impact properties of polymer composites reinforced by basalt and carbon fibers," Thermal Stresses, Vol. 36, No. 7, pp. 684-698, 2013.
[21] Lawcock, G., Ye, L., Mai, Y. W. and Sun, C.-T. J. C. S., "The effect of adhesive bonding between aluminum and composite prepreg on the mechanical properties of carbon-fiber-reinforced metal laminates," Composites Science and Technology, Vol. 57, No. 1, pp. 35-45, 1997.
[22] ASTM D 790, "Standard Test Methods for Flexural Properties of Un-reinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials," Annual Book of ASTM Standard, 2000.
[23] Haijuan, K., Hui, S., Jin, C., Haiquan, D., Xiaoma, D., Mengmeng, Q., Muhuo, Y. and Youfeng, Z. J. P. C., "Improvement of adhesion of kevlar fabrics to epoxy by surface modification with acetic anhydride in supercritical carbon dioxide," Polymer Composites, Vol. 40, No. 1, pp. 920-927, 2019.
[24] Sandesh, U. K. S. and Manujesh, B.J, "Mechanical Characterization of Kevlar/Glass Hybrid Reinforced Polymer composite laminates," International Advanced Research Journal in Science, Vol. 3, No. 12, pp. 203-220, 2016.