



بررسی تجربی تاثیر سیکل حرارتی و اصلاح سطحی فلز بر خواص خمشی کامپوزیت لایه-ای آلومینیوم-اپوکسی / الیاف بازالت

مهدی عبداللهی آذغان¹، رضا اسلامی فارسانی^{2*}

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

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

* تهران، صندوق پستی 19991-43344، eslami@kntu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 07 اردیبهشت 1396
پذیرش: 06 تیر 1396
ارائه در سایت: 27 مرداد 1396

کلید واژگان:

کامپوزیت لایه‌ای الیاف-فلز
سیکل حرارتی
الیاف بازالت
اصلاح سطحی
خواص خمشی

چکیده

در تحقیق حاضر، تاثیر سیکل حرارتی بر خواص خمشی کامپوزیت لایه‌ای الیاف-فلز مورد ارزیابی قرار گرفت. صفحات کامپوزیت لایه‌ای الیاف-فلز از دو لایه آلومینیوم 2024-T3 و لایه‌ی کامپوزیت زمینه اپوکسی متشکل از 4 لایه الیاف بازالت ساخته شده بود. برای کامپوزیت‌ها هر سیکل حرارتی در مدت زمان 6 دقیقه بین دمای 25-115 °C انجام شد. خواص خمشی نمونه‌ها بعد از 20، 35 و 55 سیکل حرارتی مورد ارزیابی قرار گرفت و با خواص خمشی نمونه‌های بدون سیکل حرارتی مقایسه شد. سیکل حرارتی، استحکام خمشی کامپوزیت با آلومینیوم اصلاح سطحی شده به روش شیمیایی (حکاک شده) را کاهش داد، در حالی که برای کامپوزیت‌های با آلومینیوم اصلاح سطحی شده به روش الکتروشیمیایی (آندایز شده)، استحکام خمشی در اثر سیکل حرارتی ابتدا افزایش یافته و سپس کاهش یافت. مدول خمشی برای هر دو نوع کامپوزیت مذکور تغییرات نامنظمی نشان داد. انرژی شکست کامپوزیت با آلومینیوم حکاک شده با افزایش سیکل حرارتی افت شدیدی را نشان داد. اما برای کامپوزیت با آلومینیوم آندایز شده، تغییرات انرژی شکست کم و نامنظم بود. بررسی میکروسکوپ نوری نیز نشان داد که برای کامپوزیت با آلومینیوم حکاک شده بعد از سیکل حرارتی، مکانیزم شکست از شکست کامپوزیت به جدایش بین لایه‌های کامپوزیت تغییر کرد، در حالی که برای کامپوزیت‌های با آلومینیوم آندایز شده، این مکانیزم، شکست کامپوزیت بوده و با انجام سیکل حرارتی تغییری نکرد.

Experimental investigation of the effect of thermal cycling and metal surface treatment on flexural properties laminate composite of aluminum-epoxy/basalt fibers

Mehdi Abdollahi Azghan, Reza Eslami-Farsani*

Faculty of Materials Science and Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 19991-43344, Tehran, Iran, eslami@kntu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 27 April 2017
Accepted 27 June 2017
Available Online 18 August 2017

Keywords:

Fiber-metal laminate
Thermal cycling
Basalt fibers
Surface treatment
Flexural properties

ABSTRACT

In this work, effect of thermal cycling on the flexural properties of fiber-metal laminate (FML) has been evaluated. FML plates were composed of two aluminum 2024-T3 and an epoxy polymer-matrix composites ply formed by four layers of basalt fibers. For FML samples the thermal cycle times were about 6 min for temperature cycles from 25 °C to 115 °C. Flexural properties were evaluated on samples after 20, 35 and 55 thermal cycles, and compared to non-exposed samples. While the thermal cycling decreased the flexural strength of chemical treated FML (etched aluminum), increasing at first, and then decreasing after a while was observed in electrochemical treated FML (anodized aluminum). The flexural modulus of FML showed irregular changes for both FML with anodized aluminum and FML with etched aluminum. The energy absorption of FML with etched aluminum showed a sharp decline with increasing thermal cycling while the energy absorption of FML with anodized aluminum showed low and irregular changes. Evaluation optical microscope showed that the mechanism of failure for the FML with etched aluminum after thermal cycling changed from failure of FML to separation between layers of FML, while for the FML with anodized aluminum before and after thermal cycling it was failure of FML and it has not changed.

1- مقدمه

الیاف‌های آلومینیومی در صنعت هوافضا توسعه یافته‌اند. این نوع کامپوزیت‌ها توانایی ارائه خواص مکانیکی عالی در مقایسه با کامپوزیت‌های تقویت شده و الیاف‌های فلزی را دارا می‌باشند. استحکام بالا، مدول الاستیسیته بالا با چقرمگی بهبود یافته و خواص خستگی عالی از جمله مزایای FML می‌باشد [1]. الیاف‌های آلومینیوم، تیتانیوم، منیزیم و فولاد به عنوان لایه فلزی در

کامپوزیت‌های هیبریدی الیاف-فلز¹ (FML) نوع جدیدی از کامپوزیت‌ها می‌باشند که از ورقه‌های فلزی و کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف شکل گرفته‌اند. انواع FML به منظور کاهش وزن محصولات برای جایگزینی با

¹ Fiber Metal Laminate

Please cite this article using:

M. Abdollahi Azghan, R. Eslami-Farsani, Experimental investigation of the effect of thermal cycling and metal surface treatment on flexural properties laminate composite of aluminum-epoxy/basalt fibers, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 8, pp. 369-376, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

زیادی روی ریزساختار و خواص مکانیکی ندارد.

اسلامی فارسانی و همکاران [11]، تاثیر سیکل حرارتی را بر روی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های پلیمری حاوی الیاف کربن و بازالت مورد مطالعه قرار دادند و مشاهده کردند با افزایش سیکل حرارتی، سختی سطح کامپوزیت کاهش می‌یابد. البته این کاهش سختی سطح برای کامپوزیتی هیبریدی حاوی الیاف بازالت و کربن نسبت به کامپوزیت‌های حاوی الیاف کربن یا الیاف بازالت کمتر بوده و پایداری حرارتی بیشتری نسبت به آن‌ها نشان می‌دهد. همچنین تاثیر سیکل حرارتی بر روی مقاومت به ضربه این کامپوزیت‌ها را نیز مورد مطالعه قرار دادند که نتایج حاصل نشان داد که جذب انرژی در حین آزمون ضربه با افزایش سیکل حرارتی، کاهش می‌یابد. کاهش در جذب انرژی در سیکل حرارتی در کامپوزیت‌های هیبریدی حاوی الیاف کربن و بازالت نسبت به کامپوزیت‌های حاوی الیاف کربن یا بازالت بیشتر بود.

خلیلی و همکاران [12]، تغییرات رفتار کششی کامپوزیت‌های پلیمری حاوی الیاف کربن و بازالت را تحت سیکل‌های حرارتی مختلف قرار دادند و مشاهده کردند با افزایش تعداد سیکل‌های حرارتی، استحکام کششی نهایی و مدول کششی در هر دو کامپوزیت پلیمری بازالت و کربن کاهش می‌یابد ولی میزان کاهش این خواص در کامپوزیت حاوی الیاف کربن بیشتر است.

سیگستروم و همکاران [13]، تاثیر سیکل حرارتی را بر روی خواص خمشی کامپوزیت تقویت شده با الیاف کربن برای درصدهای مختلف الیاف مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها دریافتند که با افزایش میزان کربن استحکام خمشی تحت سیکل حرارتی کاهش می‌یابد. برای مثال آن‌ها تغییر چشم-گیری در استحکام خمشی نمونه حاوی 24 و 36 درصد وزنی الیاف کربن بعد از سیکل حرارتی را مشاهده نکردند، در حالی که برای 47 و 58 درصد وزنی الیاف کربن سیکل حرارتی باعث کاهش زیاد استحکام خمشی شد.

با توجه به تحقیقات انجام شده قبلی (که به آن‌ها اشاره شد)، رویکرد اصلی در تحقیق حاضر، بررسی سیکل‌های حرارتی مختلف بر روی کامپوزیت‌های لایه‌ای الیاف-فلز شامل ورق‌های آلومینیوم 2024-T3 و کامپوزیت زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف بازالت می‌باشد که لایه‌های فلزی آن به دو روش شیمیایی و الکتروشیمیایی اصلاح شده است.

2- بخش تجربی

2-1- مواد

در تحقیق حاضر، رزین اپوکسی اپون² 828 همراه با هاردنر پلی آمینی³ تتا⁴ به عنوان زمینه کامپوزیت مورد استفاده قرار گرفت. طبق استاندارد ASTM D445 در دمای 25 °C، 25، گران‌روی این رزین 110-150 پواز و چگالی آن 1.16 g/ml می‌باشد [14]. بعد از عمل پخت، این رزین، خواص مکانیکی، چسبندگی و مقاومت شیمیایی خوبی را از خود نشان می‌دهد و دمای تخریب این رزین بعد از پخت به 120 °C می‌رسد [15]. پارچه الیاف بازالت (با اسم تجاری BAS 350.1270.A) از شرکت بازالتکس⁵ کشور بلژیک به عنوان تقویت کننده و آلومینیوم 2024-T3 به عنوان لایه‌های فلزی با ضخامت 0.5 mm نیز مورد استفاده قرار گرفتند.

2-2- اصلاح سطحی آلومینیوم 2024-T3

به منظور چسبندگی بهتر بین رزین و لایه آلومینیوم از دو روش حکاکی

FML مورد استفاده قرار می‌گیرند. آلیاژهای منیزیم به دلیل چگالی کم، بهبود محافظت الکترومغناطیسی و مقاومت خوردگی عالی نسبت به سایر آلیاژها برتری دارند، اما این نوع آلیاژها خواص خستگی و استاتیکی خوبی را از خود نشان نمی‌دهند. آلیاژهای تیتانیوم خواص خوبی را در خستگی، ضربه و سفتی ارائه می‌کنند، ولی چگالی بالا و انعطاف‌پذیری کم و گران بودن آن از جمله معایبی است که استفاده از آن را در کامپوزیت‌های الیاف-فلز محدود کرده است [3,2]. آلومینیوم 2024 و آلومینیوم 7075 از جمله آلومینیوم‌های آلیاژی مورد استفاده در کامپوزیت‌های الیاف-فلز می‌باشد. خواص مکانیکی خوب از قبیل چقرمگی شکست بالا، استحکام خوب و ارزان بودن این نوع آلیاژها باعث استفاده بیشتر از آن‌ها نسبت به سایر آلیاژهای مورد استفاده در کامپوزیت‌های الیاف-فلز شده است [4,3].

الیاف بازالت از نظر استحکام کششی، بین الیاف شیشه تجاری مرسوم (نوع E) و الیاف شیشه با استحکام بالا (نوع S) قرار دارد و از نظر مدول کششی کمی بیشتر از الیاف شیشه نوع S می‌باشد. مقاومت بالا در محیط اسیدی و بازی، مقاومت حرارتی بالا و جذب صدا از دیگر ویژگی‌های الیاف بازالت می‌باشد. با توجه به برتری اقتصادی الیاف بازالت نسبت به الیاف شیشه نوع S، این الیاف می‌تواند جایگزین این نوع شیشه در کامپوزیت‌های حاوی الیاف باشد [6,5].

علاوه بر اهمیت تقویت کننده و زمینه در کامپوزیت‌های پلیمری، پیوند بین صفحات کامپوزیت و لایه‌های فلزی یک مسئله مهم برای عملکرد کامپوزیت الیاف-فلز می‌باشد. عملکرد خوب کامپوزیت پلیمری و لایه فلزی نیازمند اطمینان از یک پیوند مکانیکی خوب بین این لایه‌ها می‌باشد. استفاده از عوامل متصل کننده به عنوان چسب بین کامپوزیت پلیمری و فلز و همچنین عملیات سطحی مانند مکانیکی، شیمیایی و الکتروشیمیایی می‌تواند به عنوان بهبود دهنده چسبندگی بین کامپوزیت و فلز عمل کند [1]. استفاده از ترموپلاست‌ها مانند پلی اتر ایمید¹ به عنوان چسب بین کامپوزیت و فلز چسبندگی خوبی را ارائه می‌کند ولی باعث کاهش چقرمگی و استحکام خمشی کامپوزیت الیاف-فلز می‌گردد. عملیات شیمیایی و الکتروشیمیایی باعث ایجاد سطح متخلخل بر روی لایه فلزی می‌شود و افزایش قفل مکانیکی و انتقال بهتر بار را به همراه دارد. آندایز کردن در محلول اسید سولفوریک علاوه بر چسبندگی، مقاومت به خوردگی را نیز بهبود می‌بخشد، ولی مقاومت به خوردگی آن به اندازه آندایز توسط اسید کرومیک نمی‌باشد. مشکلی که اسید کرومیک ایجاد می‌کند عدم سازگاری با محیط زیست می‌باشد که البته محققان اخیراً با عملیات سطحی با کرومات آزاد این مشکل را حل کرده‌اند [8,7].

سیکل حرارتی در مواد کامپوزیتی دارای مشکلات پیچیده‌ای مانند خواص حرارتی متفاوت برای هر ماده می‌باشد. یکی از مهم‌ترین مشکلات خواص حرارتی، تفاوت در ضریب انبساط حرارتی مواد به هم چسبیده می‌باشد. بنابراین هنگامی که مواد گرم می‌شوند، انبساط حرارتی متفاوت باعث تغییر حجم متفاوت اجزای کامپوزیت شده و همین اتفاق باعث جدایش لایه‌های کامپوزیتی می‌گردد [9].

کاستا و همکاران [10]، تاثیر سیکل حرارتی بر روی خواص مکانیکی کامپوزیت الیاف-فلز حاوی الیاف شیشه را مورد بررسی قرار دادند. در این بررسی به منظور چسبندگی بهتر بین کامپوزیت پلیمری و فلز از ماده ترموپلاستیک استفاده کردند. آن‌ها مشاهده کردند که سیکل حرارتی تاثیر

² Epon

³ Polyamine Hardener

⁴ TETA (EPIKURE 3234)

⁵ Basaltex

¹ Polyetherimide

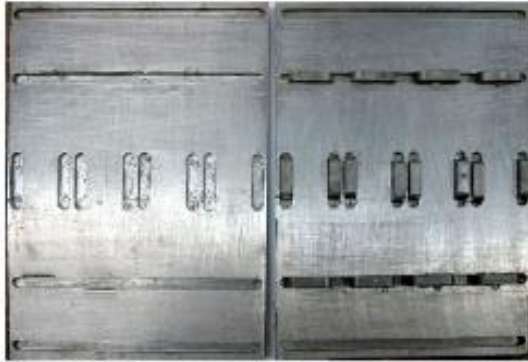


Fig. 2 Designed mold for making of FML

شکل 2 قالب طراحی شده برای ساخت کامپوزیت الیاف- فلز

نیز نگهداری شد. به منظور اندازه‌گیری دقیق دمای نمونه از ترموکوپل مدل USB-4718 شرکت ادونتیج¹ استفاده شد. در تحقیق حاضر، تعداد سیکل‌های 20، 35 و 55 به نمونه‌ها داده شد. "شکل‌های 3 و 4" به ترتیب کوره سیکل حرارتی و مشخصات یک سیکل حرارتی را نشان می‌دهد.

5-2- بررسی میکروسکوپی نمونه‌ها

به منظور بررسی سطوح شکست کامپوزیت‌ها و نوع مکانیزم شکست از میکروسکوپ نوری صا ایران مدل 2000 استفاده شد. همچنین میکروسکوپ

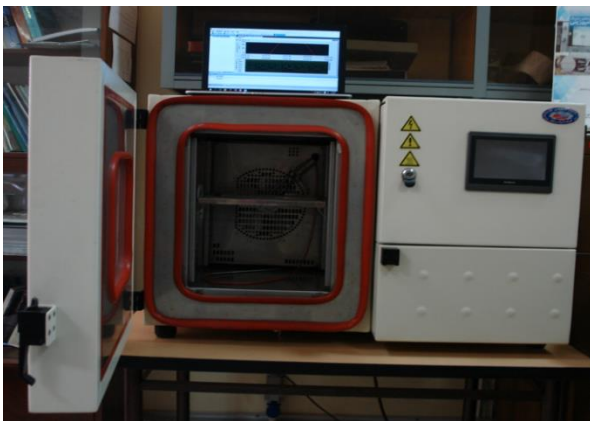


Fig. 3 Thermal cycling furnace

شکل 3 کوره سیکل حرارتی

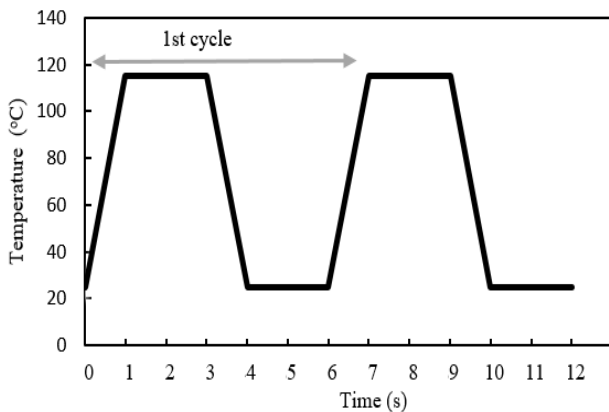


Fig. 4 Thermal cycle profile

شکل 4 نمایی از سیکل حرارتی

کردن و آندایز بر روی ورقه‌های آلومینیوم 2024-T3 استفاده شد. در روش حکاکی بعد از پاک کردن سطح ورقه‌های آلومینیومی توسط استون، این ورقه‌ها در محلول 4 درصد وزنی هیدروکسید سدیم در دمای 50 °C به مدت 2 دقیقه قرار گرفت. در روش آندایز کردن ابتدا سطح نمونه را به منظور حذف لایه اکسیدی ضعیف و خراش‌های احتمالی روی سطح آلومینیوم در محلول 1.5 درصد وزنی هیدروکسید سدیم در دمای 60 °C به مدت 2 دقیقه قرار داده سپس به منظور دی‌اکساید کردن سطح، نمونه به مدت 5 دقیقه در محلول آبی حاوی چند قطره اسید نیتریک 66 درصد وزنی قرار گرفت. بعد از آماده سازی ورقه آلومینیوم، نمونه در محلول 0.3 درصد وزنی در دمای 55 °C با جریان ثابت 0.7 A/dm² به مدت 45 دقیقه تحت آندایز قرار گرفت. "شکل 1" فرآیند آندایز در آلومینیوم 2024-T3 را نشان می‌دهد.

3-2- ساخت نمونه‌ها

به‌منظور ساخت نمونه‌های کامپوزیت الیاف- فلز، ابتدا رزین و هاردنر با نسبت وزنی 100 به 10 با یکدیگر مخلوط شده و به مدت 5 دقیقه هم زده شد، سپس مخلوط به‌دست آمده به عنوان زمینه به روش لایه‌گذاری دستی مورد استفاده قرار گرفت. در ساخت نمونه‌ها، 4 لایه پارچه الیاف بازالت با نسبت حجمی رزین به الیاف (30 به 70) به‌کار گرفته شد و سپس کامپوزیت پلیمری به‌دست آمده با ضخامت میانگین 0.8 mm بین دو لایه آلومینیوم 2024-T3 که ضخامت هر کدام از لایه‌ها 0.5 mm می‌باشد، قرار گرفت. به منظور پخت نهایی نمونه‌ها، کامپوزیت به‌دست آمده با ابعاد 25×2.5×1.8 mm³ در قالب طراحی شده برای ساخت کامپوزیت الیاف- فلز در دمای 25 °C به مدت 18 ساعت قرار گرفتند. "شکل 2" قالب طراحی شده برای ساخت نمونه‌های آزمون خمش کامپوزیت الیاف- فلز می‌باشد. به منظور پخت نهایی و دست‌یابی به حداکثر میزان استحکام در نمونه‌ها، مرحله سیکل حرارتی حدود 3 هفته بعد از مرحله ساخت انجام گرفت.

4-2- سیکل حرارتی نمونه‌ها

هر سیکل حرارتی به مدت 6 دقیقه انجام شد و ابتدا دمای نمونه از دمای 25 °C در مدت زمان 1 دقیقه با نرخ گرمایش 1.5 °C/s به دمای 115 °C رسیده و به مدت 2 دقیقه در این دما نگهداری شد تا تمامی قسمت‌های نمونه به دمای موردنظر برسند. و بعد از آن در مدت 1 دقیقه با نرخ سرمایش 1.5 °C/s از دمای 115 °C به 25 °C رسیده و به مدت 2 دقیقه در این دما

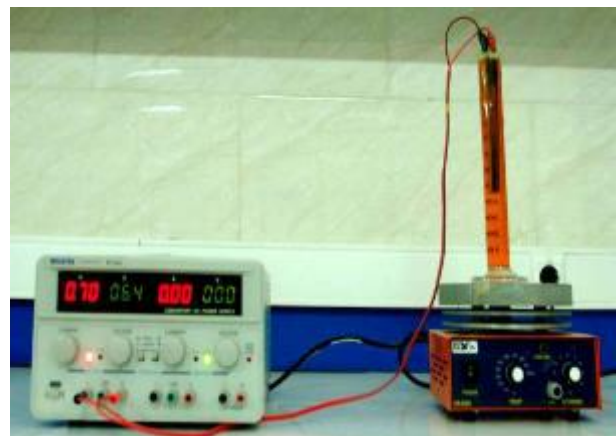


Fig. 1 Process of anodizing of aluminum

شکل 1 فرآیند آندایز آلومینیوم

¹ Advantech

سیکل‌های حرارتی استحکام خمشی کاهش می‌یابد. در این نوع کامپوزیت‌ها بیشترین استحکام مربوط به نمونه بدون سیکل (590.13 MPa) می‌باشد. در کامپوزیت‌های با آلومینیوم آندایز شده، استحکام خمشی با افزایش سیکل حرارتی ابتدا افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد. در این کامپوزیت‌ها بیشترین استحکام خمشی مربوط به کامپوزیت با تعداد 20 سیکل حرارتی می‌باشد (859.79 MPa) که نسبت به نمونه‌های بدون سیکل حرارتی افزایش 29 درصدی استحکام خمشی را نشان می‌دهد. نمونه‌های با آلومینیوم حکاکی شده نسبت به نمونه‌های با آلومینیوم آندایز شده به سیکل حرارتی حساسیت زیادی نشان می‌دهند و استحکام خمشی آن با نرخ بیشتری کاهش پیدا می‌کند؛ به طوری که بعد از 55 سیکل حرارتی میزان استحکام خمشی آن به مقدار 263.27 MPa افت کرده و در حدود 55 درصد نسبت به نمونه بدون سیکل حرارتی کاهش یافته است؛ در حالی که برای نمونه‌های با آلومینیوم آندایز شده میزان استحکام خمشی بعد از 55 سیکل حرارتی به 603.13 MPa افت کرده که نسبت به نمونه بدون سیکل 9 درصد کاهش یافته است. افزایش تعداد سیکل‌های حرارتی باعث سست شدن فصل مشترک بین فلز و کامپوزیت پلیمری می‌گردد و احتمال جدایش بین فلز و کامپوزیت پلیمری با افزایش تعداد سیکل‌ها بیشتر می‌گردد و همین اتفاق میزان استحکام خمشی را کاهش می‌دهد.

"شکل 6" تاثیر سیکل حرارتی بر روی مدول خمشی را نشان می‌دهد که تغییرات مدول خمشی به صورت غیرمنظم می‌باشد. بیشترین مدول خمشی در کامپوزیت با آلومینیوم حکاکی شده مربوط به نمونه با 35 سیکل حرارتی با مقدار 57.10 GPa می‌باشد که نسبت به نمونه بدون سیکل حرارتی 9 درصد

جدول 2 نتایج آزمون خمش سه نقطه‌ای کامپوزیت‌های الیاف- فلز

مدول خمشی (GPa)	استحکام خمشی (MPa)	کد نمونه
57.74	665.19	A-0C
70.69	859.79	A-20C
52.93	703.61	A-35C
56.77	603.10	A-55C
52.41	590.13	E-0C
53.38	522.03	E-20C
57.10	331.00	E-35C
53.95	263.27	E-55C

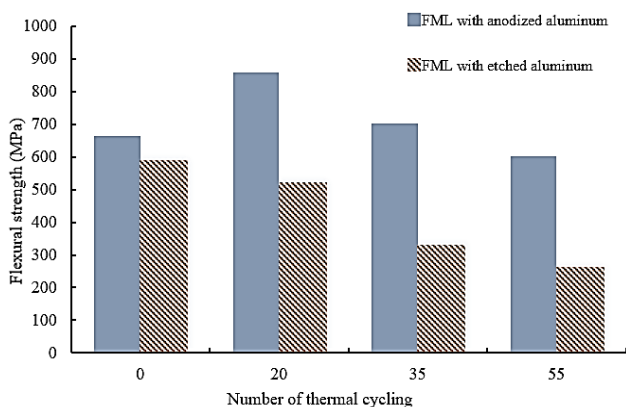


Fig. 5 The effect of thermal cycling on the flexural strength of FML

شکل 5 تاثیر سیکل حرارتی بر روی استحکام خمشی کامپوزیت الیاف- فلز

الکترونی روبشی¹ (SEM) مدل VEGA\\TESCAN-LMU به منظور مطالعه سطح آلومینیوم‌های اصلاح سطحی شده و مشخص کردن علت تفاوت در نوع مکانیزم‌های شکست در کامپوزیت با آلومینیوم حکاکی شده و کامپوزیت با آلومینیوم آندایز شده، به کار گرفته شد.

2-6- آزمون مکانیکی

به منظور بررسی رفتار خمشی نمونه‌ها از دستگاه خمش سه نقطه‌ای هانسفیلد² مدل H25KS و استاندارد ASTM D790 استفاده شد [16]. در آزمون خمش، نمونه‌ها با ابعاد 25×150 mm² به گونه‌ای روی فیکسچر³ قرار گرفت که حدود 50 درصد طول آن به منظور جلوگیری از لغزش نمونه در حین آزمون بیرون از تکیه‌گاه قرار داشت. نمونه‌ها تحت بارگذاری با نرخ کرنش 3 mm/min قرار گرفتند و نیروی خمشی برحسب جابجایی محوری در قالب نمودار توسط دستگاه رسم شد که از آن برای تحلیل خواص خمشی استفاده گردید.

جدول 1 نشان‌دهنده کد نمونه‌های تحت آزمون خمش می‌باشد که در آن حرف "A" نشان دهنده نمونه‌های آندایز شده و حرف "E" نشان‌دهنده نمونه‌های حکاکی شده می‌باشد. علامت "C" نیز نشان‌دهنده سیکل حرارتی بوده و عدد پیش از آن نشان‌دهنده تعداد سیکل‌های حرارتی است.

3- نتایج و بحث

3-1- بررسی رفتار خمشی کامپوزیت‌ها

3-1-1- مدول و استحکام خمشی

در تحقیق حاضر، نتایج آزمون خمش کامپوزیت‌های الیاف- فلز با اصلاح سطحی مختلف در جدول 2 و به صورت نمودار در "شکل‌های 5 و 6" آورده شده است. در مقایسه کامپوزیت‌های بدون سیکل حرارتی، نمونه‌هایی که سطح آلومینیوم آن‌ها به روش آندایز متخلخل شده نسبت به نمونه‌هایی که سطح آلومینیوم آن‌ها توسط حکاکی متخلخل شده‌اند، استحکام خمشی و مدول خمشی بیشتری دارند. به طوری که برای نمونه‌های با آلومینیوم آندایز شده، استحکام خمشی 665.19 MPa و مدول خمشی 57.74 GPa و برای نمونه‌های با آلومینیوم حکاکی شده، استحکام خمشی 590.13 MPa و مدول خمشی 52.41 GPa می‌باشد.

تاثیر سیکل حرارتی بر روی استحکام خمشی در "شکل 5" نشان داده شده است. در کامپوزیت‌های با آلومینیوم حکاکی شده با افزایش تعداد

جدول 1 کد نمونه‌ها با نوع عملیات سطحی و تعداد سیکل‌های حرارتی

Table 1 The code samples with the type of surface treatment and the number of thermal cycles

تعداد سیکل حرارتی	نوع عملیات سطحی	کد نمونه
0	آندایز شده	A-0C
20	آندایز شده	A-20C
35	آندایز شده	A-35C
55	آندایز شده	A-55C
0	حکاکی شده	E-0C
20	حکاکی شده	E-20C
35	حکاکی شده	E-35C
55	حکاکی شده	E-55C

¹ Scanning Electron Microscope

² Hounsfield

³ Fixture

با آلومینیوم حکاکی شده و اندازه‌ی شده با تعداد 35 سیکل حرارتی قبل و بعد از آزمون خمش سه نقطه‌ای را نشان می‌دهد.

با توجه به "شکل‌های 8-الف و 8-ب"، مکانیزم شکست در کامپوزیت با آلومینیوم حکاکی شده، جدایش بین کامپوزیت پلیمری و آلومینیوم می‌باشد (فلش در شکل 8-ب). بنابراین اعمال سیکل حرارتی به کامپوزیت‌های الیاف- فلز با آلومینیوم حکاکی شده باعث ضعیف شدن قفل مکانیکی بین کامپوزیت پلیمری و آلومینیوم گردیده و استحکام کامپوزیت در برابر بار اعمالی را کاهش می‌دهد. همچنین با توجه به کاهش استحکام خمشی و همچنین عدم توانایی نمونه برای تحمل کرنش زیاد، کاهش انرژی شکست را نیز منجر می‌شود که کاهش استحکام خمشی و انرژی شکست به ترتیب در "شکل‌های 5 و 7" مشهود است.

"شکل‌های 9-الف و 9-ب" به ترتیب کامپوزیت با آلومینیوم اندازه‌ی شده قبل و بعد از آزمون خمش سه نقطه‌ای را نشان می‌دهند. قفل مکانیکی خوب بین کامپوزیت پلیمری و آلومینیوم از جدایش بین این دو لایه بعد از سیکل حرارتی در حین آزمون خمش جلوگیری کرده و در نهایت با افزایش میزان بار وارده بر نمونه ابتدا شکست از لایه آلومینیومی شروع شده و در نهایت با جدا شدن دو مقطع شکسته شده آلومینیوم (فلش مشکی در شکل 9-ب)، جدایش در لایه‌های کامپوزیت پلیمری رخ می‌دهد (فلش سفید در

افزایش مدول خمشی داشته است. در کامپوزیت‌های با آلومینیوم اندازه‌ی شده بیشترین مدول خمشی مربوط به نمونه با 20 سیکل حرارتی با مقدار 70.69 می‌باشد که نسبت به نمونه بدون سیکل حرارتی 22 درصد افزایش مدول خمشی را نشان می‌دهد. در حالت کلی در این نمونه‌ها میزان حساسیت مدول خمشی به سیکل حرارتی نسبت به استحکام خمشی کمتر بوده و با نرخ کمتری تغییر می‌کند.

2-1-3- انرژی شکست

با توجه به "شکل 7"، در نمونه‌های بدون سیکل حرارتی میزان جذب انرژی در کامپوزیت‌های با آلومینیوم حکاکی شده نسبت به کامپوزیت‌های با آلومینیوم اندازه‌ی شده در حدود 28 J/mm^2 کمتر می‌باشد. با انجام سیکل حرارتی میزان انرژی شکست در آزمون خمش در نمونه‌های با آلومینیوم حکاکی شده به شدت افت می‌کند به طوری که میزان جذب انرژی با انجام تعداد 55 سیکل حرارتی از 143.34 J/mm^2 به 5.23 J/mm^2 (در حدود 96 درصد) کاهش می‌یابد. ولی در نمونه‌های با سطح اندازه‌ی شده انرژی شکست با توجه به تعداد سیکل‌ها از نظم خاصی پیروی نمی‌کند و بیشترین تغییرات مربوط به نمونه با 20 سیکل حرارتی می‌باشد که نسبت به نمونه بدون سیکل از 170.63 J/mm^2 به 185.59 J/mm^2 (در حدود 9 درصد) افزایش جذب انرژی داشته است.

2-2-3- بررسی سطوح شکست

"شکل‌های 8 و 9"، تصاویر میکروسکوپ نوری از سطح مقطع نمونه کامپوزیت

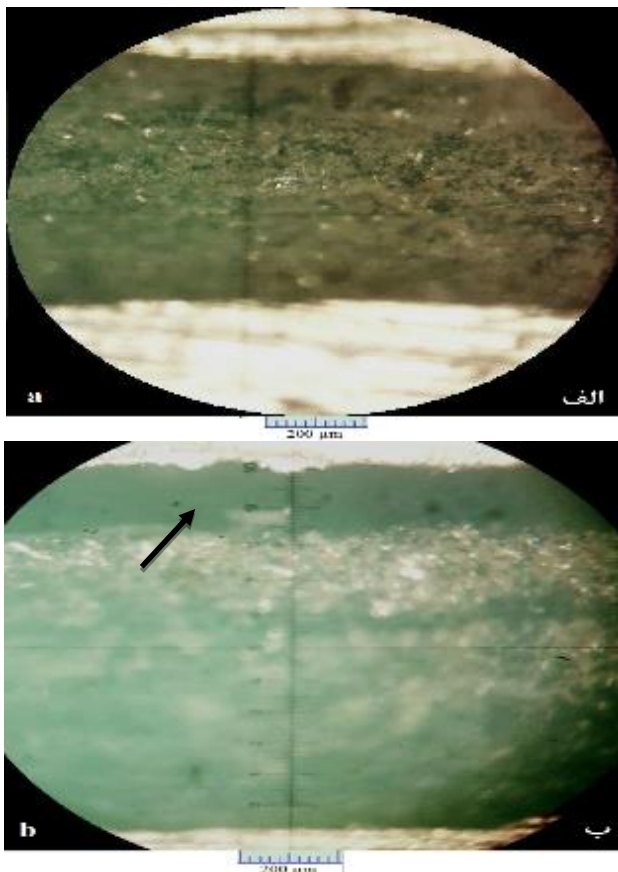


Fig. 8 Optical microscopy images of cross-section of FML thermal cycled (35 thermal cycling), a) FML with etched aluminum before three-point bending test, b) FML with etched aluminum after three-point bending test

شکل 8 تصاویر میکروسکوپ نوری از سطح مقطع کامپوزیت الیاف- فلز سیکل داده شده (35 سیکل حرارتی)، الف) کامپوزیت الیاف- فلز با آلومینیوم حکاکی شده قبل از آزمون خمش سه نقطه‌ای، ب) کامپوزیت الیاف- فلز با آلومینیوم حکاکی شده بعد از آزمون خمش سه نقطه‌ای

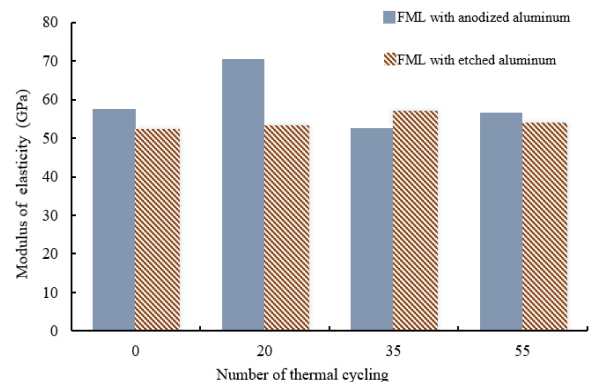


Fig. 6 The effect of thermal cycling on the flexural modulus of FML

شکل 6 تاثیر سیکل حرارتی بر روی مدول خمشی کامپوزیت الیاف- فلز

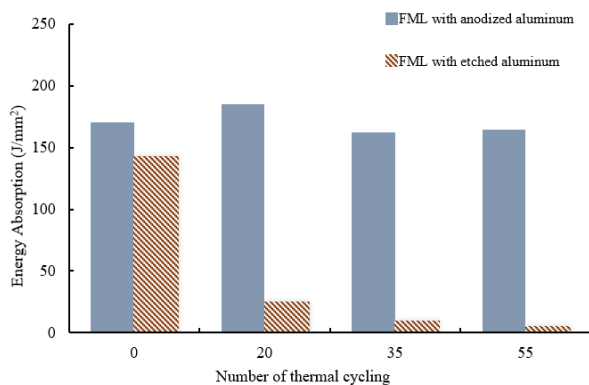


Fig. 7 The effect of thermal cycling on the energy absorption behavior of FML

شکل 7 تاثیر سیکل حرارتی بر روی رفتار جذب انرژی کامپوزیت الیاف- فلز

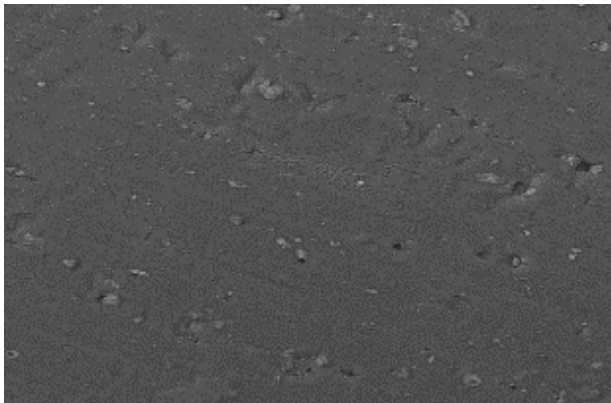


Fig. 10 SEM images of etched aluminum surface

شکل 10 تصویر میکروسکوپی از سطح آلومینیوم حکاکی شده

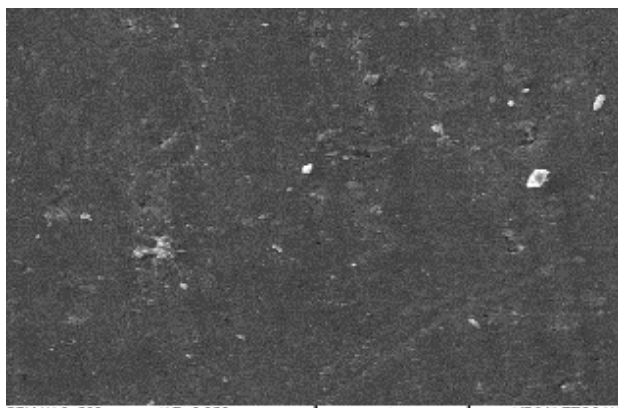


Fig. 11 SEM images of etched aluminum surface after thermal cycling

شکل 11 تصویر میکروسکوپی از سطح آلومینیوم حکاکی شده بعد از سیکل حرارتی

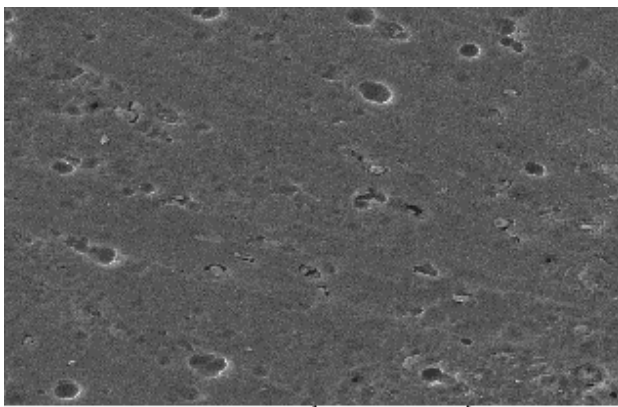


Fig. 12 SEM images of anodized aluminum surface

شکل 12 تصویر میکروسکوپی از سطح آلومینیوم آندایز شده

آلومینیوم نفوذ کرده و قفل مکانیکی بهتری بین کامپوزیت پلیمری و آلومینیوم ایجاد شود. قفل مکانیکی خوب عاملی برای بهتر شدن مقدار استحکام و مدول خمشی و انرژی شکست نمونه آندایز شده نسبت به نمونه حکاکی شده می‌باشد.

در طول عملیات حکاکی، لایه‌ای سیاه رنگ شامل ذرات اکسیدی، ترکیبات بین فلزی و سیلیس که در محلول قلیایی نامحلول می‌باشد، روی سطح آلومینیوم تشکیل می‌شود که این لایه نسبت به حرارت ناپایدار

شکل 9-ب). جلوگیری از جدایش بین لایه کامپوزیت پلیمری و آلومینیوم باعث افزایش استحکام خمشی شده و میزان کرنش نیز افزایش می‌یابد. بنابراین پایداری این نوع کامپوزیت‌ها در برابر سیکل‌های حرارتی از افت شدید استحکام خمشی و کرنش جلوگیری کرده و باعث می‌شود اختلاف کمی در استحکام خمشی و انرژی شکست کامپوزیت با سیکل حرارتی نسبت به کامپوزیت بدون سیکل حرارتی وجود داشته باشد. این اختلاف کم در استحکام خمشی و انرژی شکست در نمونه‌های با و بدون سیکل حرارتی در "شکل‌های 5 و 7" مشاهده می‌شود.

3-3- بررسی سطح آلومینیوم‌های عملیات سطحی شده

در این مرحله دو نمونه آلومینیوم حکاکی شده یکی بدون سیکل حرارتی و دیگری با تعداد 55 سیکل حرارتی و دو نمونه آلومینیوم آندایز شده یکی بدون سیکل حرارتی و دیگری با تعداد 55 سیکل حرارتی مورد مطالعه قرار گرفتند. تصاویر حاصل از میکروسکوپ SEM در "شکل‌های 10 تا 13" آورده شده است.

"شکل‌های 10 و 12" تفاوت بین سطح آلومینیوم حکاکی شده و سطح آندایز شده بدون سیکل حرارتی را نشان می‌دهد. با توجه به "شکل‌های 10 و 12" در یک سطح مشخص، میزان تخلخل‌های نمونه آندایز شده نسبت به نمونه حکاکی شده بیشتر است؛ بنابراین پلیمر می‌تواند بیشتر در سطح

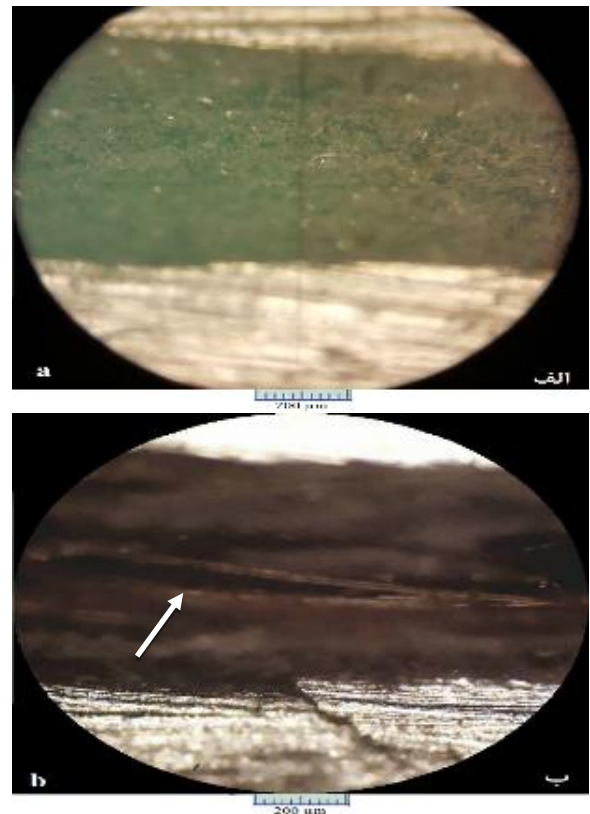


Fig. 9 Optical microscopy images of cross-section of FML thermal cycled (35 thermal cycling), a) FML with anodized aluminum before three-point bending test, b) FML with anodized aluminum after three-point bending test

شکل 9 تصاویر میکروسکوپ نوری از سطح مقطع کامپوزیت الیاف- فلز سیکل داده شده (35 سیکل حرارتی)، الف) کامپوزیت الیاف- فلز با آلومینیوم آندایز شده قبل از آزمون خمش سه نقطه‌ای، ب) کامپوزیت الیاف- فلز با آلومینیوم آندایز شده بعد از آزمون خمش سه نقطه‌ای

می‌باشد. در مقایسه بین "شکل 10 و 11"، این لایه در اثر سیکل حرارتی باعث از بین رفتن تخلخل‌های حاصل از حکاکی شده و میزان این تخلخل‌ها کاهش می‌یابد، کاهش تخلخل باعث کاهش قفل مکانیکی بین کامپوزیت پلیمری و فلز می‌شود. ضعیف شدن پیوند مکانیکی باعث می‌شود تا مکانیزم شکست از شکست لایه آلومینیومی به جدایش بین لایه کامپوزیتی و لایه آلومینیومی تغییر پیدا کند و نمونه سیکل داده شده نسبت به نمونه بدون سیکل، استحکام خمشی و انرژی شکست کمتری داشته باشد.

"شکل 13" سطح آلومینیوم آندایز شده بعد از سیکل حرارتی را نشان می‌دهد. در مقایسه بین "شکل 12 و 13" تفاوت چندانی بین نمونه آندایز شده بدون سیکل حرارتی و نمونه آندایز شده بعد از سیکل حرارتی وجود ندارد و میزان تخلخل‌ها در یک سطح مشخص، تقریباً برابر می‌باشد.

4-3- بررسی رفتار کامپوزیت پلیمری در سیکل حرارتی

سیکل حرارتی علاوه بر این که بر روی چسبندگی بین کامپوزیت پلیمری و آلومینیوم تاثیر می‌گذارد، باعث جدایش و یا تضعیف پیوند بین الیاف و پلیمر نیز می‌گردد. نتیجه‌گیری کلی بر روی رفتار پلیمر این است که تعدادی از مکانیزم‌ها باعث افزایش سفتی کامپوزیت پلیمری و تعدادی باعث کاهش آن در طول فرایند سیکل حرارتی شده است. پخت ثانویه¹ عاملی است که باعث افزایش میزان سفتی رزین در طول سیکل حرارتی شده است. پخت ثانویه، فرآیندی در دمای بالا می‌باشد که باعث اتصالات عرضی² ثانویه می‌شود که باعث افزایش چگالی اتصالات عرضی می‌گردد و به منظور رسیدن به حداکثر خواص فیزیکی رزین انجام می‌گیرد. این مرحله بعد از کامل شدن مرحله پخت صورت می‌پذیرد [12].

با توجه به نزدیک بودن دمای سیکل بالا به دمای تخریب رزین، ترکیبات زنجیره‌های طولانی رزین شروع به شکستن می‌کنند و رادیکال‌های آزاد را ایجاد می‌کنند و واکنش رادیکال‌های آزاد با اکسیژن باعث حذف هیدروژن از زنجیره شده و با تکرار همین فرایند باعث تخریب پلیمر می‌گردد. تخریب حرارتی پلیمر باعث تغییر در خواص رزین شده و باعث کاهش انعطاف‌پذیری و ترد شدن کامپوزیت می‌شود. در مقابل پخت ثانویه که باعث افزایش خواص مکانیکی کامپوزیت می‌شود اثر تضعیف سیکل شوک حرارتی وجود دارد که ممکن است بر اثر پخت ثانویه غلبه کرده و باعث کاهش خواص

با توجه به نزدیک بودن دمای سیکل بالا به دمای تخریب رزین، ترکیبات زنجیره‌های طولانی رزین شروع به شکستن می‌کنند و رادیکال‌های آزاد را ایجاد می‌کنند و واکنش رادیکال‌های آزاد با اکسیژن باعث حذف هیدروژن از زنجیره شده و با تکرار همین فرایند باعث تخریب پلیمر می‌گردد. تخریب حرارتی پلیمر باعث تغییر در خواص رزین شده و باعث کاهش انعطاف‌پذیری و ترد شدن کامپوزیت می‌شود. در مقابل پخت ثانویه که باعث افزایش خواص مکانیکی کامپوزیت می‌شود اثر تضعیف سیکل شوک حرارتی وجود دارد که ممکن است بر اثر پخت ثانویه غلبه کرده و باعث کاهش خواص

با توجه به "شکل 7" با افزایش تعداد سیکل حرارتی، میزان جذب انرژی برای نمونه‌های با آلومینیوم حکاکی شده به سرعت افت می‌کند و این به دلیل تغییر مکانیزم شکست از شکست لایه فلزی به جدایش بین کامپوزیت پلیمری و لایه‌های فلز می‌باشد. در مکانیزم جدایش بین لایه‌ها، افزایش تعداد سیکل‌های حرارتی باعث ضعیف شدن قفل مکانیکی بین لایه فلزی و کامپوزیت پلیمری می‌شود که در نتیجه اجزای نمونه در اثر بار اعمالی کم از یکدیگر جدا شده و باعث شکست زودرس کامپوزیت الیاف- فلز می‌شود. در نمونه‌های با آلومینیوم آندایز شده چون مکانیزم شکست تغییر پیدا نمی‌کند بنابراین میزان جذب انرژی به رفتار مکانیکی کامپوزیت پلیمری بستگی دارد. غیرمنظم بودن میزان جذب انرژی در نمونه‌های با آلومینیوم آندایز شده نشان‌دهنده رقابت بین دو مکانیزم پخت ثانویه و اثر تضعیف سیکل شوک حرارتی می‌باشد. با غلبه مکانیزم پخت ثانویه بر اثر تضعیف سیکل شوک حرارتی، خواص مکانیکی کامپوزیت الیاف- فلز افزایش پیدا کرده و در نتیجه میزان جذب انرژی نیز بیشتر شده است.

4- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، تاثیر سیکل‌های حرارتی مختلف با تعداد 20، 35 و 55 بر روی کامپوزیت‌های لایه‌ای الیاف- فلز شامل ورق‌های آلومینیوم 2024-T3 اصلاح شده به دو روش شیمیایی (حکاکی شده) و الکتروشیمیایی (آندایز شده) و کامپوزیت زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف بازالت مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن به شرح ذیل است:

با توجه به "شکل 7" با افزایش تعداد سیکل حرارتی، میزان جذب انرژی برای نمونه‌های با آلومینیوم حکاکی شده به سرعت افت می‌کند و این به دلیل تغییر مکانیزم شکست از شکست لایه فلزی به جدایش بین کامپوزیت پلیمری و لایه‌های فلز می‌باشد. در مکانیزم جدایش بین لایه‌ها، افزایش تعداد سیکل‌های حرارتی باعث ضعیف شدن قفل مکانیکی بین لایه فلزی و کامپوزیت پلیمری می‌شود که در نتیجه اجزای نمونه در اثر بار اعمالی کم از یکدیگر جدا شده و باعث شکست زودرس کامپوزیت الیاف- فلز می‌شود. در نمونه‌های با آلومینیوم آندایز شده چون مکانیزم شکست تغییر پیدا نمی‌کند بنابراین میزان جذب انرژی به رفتار مکانیکی کامپوزیت پلیمری بستگی دارد. غیرمنظم بودن میزان جذب انرژی در نمونه‌های با آلومینیوم آندایز شده نشان‌دهنده رقابت بین دو مکانیزم پخت ثانویه و اثر تضعیف سیکل شوک حرارتی می‌باشد. با غلبه مکانیزم پخت ثانویه بر اثر تضعیف سیکل شوک حرارتی، خواص مکانیکی کامپوزیت الیاف- فلز افزایش پیدا کرده و در نتیجه میزان جذب انرژی نیز بیشتر شده است.

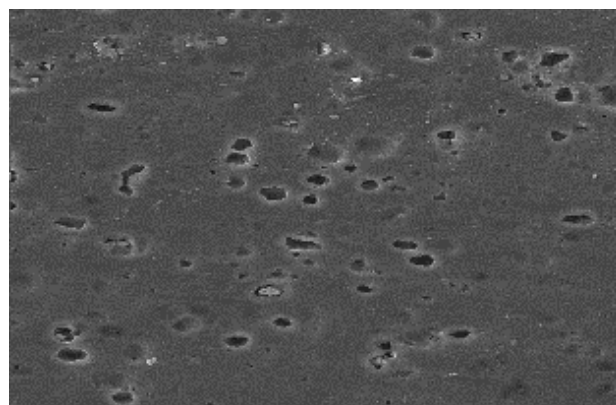


Fig. 13 SEM images of anodized aluminum surface after thermal cycling

شکل 13 تصویر میکروسکوپی از سطح آلومینیوم آندایز شده بعد از سیکل حرارتی

¹ Post Curing

² Cross-linking

1- استحکام خمشی نمونه‌های با آلومینیوم حکاکی شده نسبت به نمونه‌های آندایز شده در حدود 12 درصد کمتر می‌باشد. حساسیت به سیکل حرارتی در نمونه‌های با آلومینیوم حکاکی شده نسبت به نمونه‌های با آلومینیوم آندایز شده بیشتر می‌باشد. به طوری که نمونه‌های با آلومینیوم حکاکی شده بعد از 55 سیکل حدود 55 درصد از استحکام خمشی خود را نسبت به نمونه بدون سیکل از دست می‌دهند. در نمونه‌های با آلومینیوم آندایز شده میزان افت استحکام خمشی نمونه‌های با 55 سیکل حرارتی نسبت به نمونه‌های بدون سیکل حرارتی در حدود 9 درصد می‌باشد. استحکام نمونه‌های با آلومینیوم حکاکی شده با افزایش تعداد سیکل‌ها کاهش می‌یابد، در حالی که نمونه‌های با آلومینیوم آندایز شده با افزایش میزان سیکل‌ها ابتدا افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد.

2- مدول خمشی برای هر دو نمونه با آلومینیوم حکاکی شده و آندایز شده به صورت نامنظم تغییر می‌کند که علت آن غلبه مکانیزم‌های پخت ثانویه و اثر تضعیف سیکل حرارتی بر هم می‌باشد. بیشترین تغییر مدول مربوط به نمونه آندایز شده با 20 سیکل حرارتی می‌باشد که در حدود 22 درصد افزایش مدول نسبت به نمونه بدون سیکل را از خود نشان می‌دهد.

3- سیکل حرارتی باعث افت شدید انرژی شکست نمونه‌های با آلومینیوم حکاکی شده می‌شود به طوری که نمونه‌های مذکور بعد از 55 سیکل حرارتی 96 درصد افت انرژی شکست را از خود نشان می‌دهند. پایداری حرارتی نمونه‌های با آلومینیوم آندایز شده باعث تغییرات کم در میزان انرژی شکست در نمونه با 55 سیکل حرارتی شده و فقط 9 درصد افت در میزان انرژی شکست را نسبت به نمونه بدون سیکل نشان می‌دهد.

4- فرایند سیکل حرارتی باعث تغییر در سطح آلومینیوم حکاکی شده می‌شود و میزان تخلخل‌ها با افزایش تعداد سیکل‌ها کاهش می‌یابد، ولی با توجه به پایداری حرارتی بالای سطح آلومینیوم آندایز شده، سیکل حرارتی تاثیر چندانی روی سطح آلومینیوم در این حالت نمی‌گذارد.

5- سیکل حرارتی باعث تغییر در رفتار خمشی کامپوزیت‌های الیاف- فلز می‌گردد که دامنه این تغییرات به میزان زیادی به چسبندگی بین کامپوزیت پلیمری و فلز بستگی دارد. هر چه قفل مکانیکی بین کامپوزیت پلیمری و فلز بهتر باشد، افت خواص خمشی کمتر خواهد بود. به همین دلیل میزان تغییرات خواص خمشی در نمونه‌های با آلومینیوم آندایز شده بسیار کمتر از نمونه‌های با آلومینیوم حکاکی شده می‌باشد.

6- سیکل حرارتی در کامپوزیت‌های با آلومینیوم حکاکی شده با تضعیف پیوند مکانیکی بین کامپوزیت پلیمری و آلومینیوم باعث تغییر مکانیزم شکست از شکست آلومینیوم به جدایش بین لایه‌های کامپوزیت می‌گردد اما در کامپوزیت‌های با آلومینیوم آندایز شده تغییر مکانیزم حتی در تعداد 55 سیکل حرارتی نیز دیده نمی‌شود.

7- پخت ثانویه در طی فرایند سیکل حرارتی عاملی برای بهبود خواص خمشی کامپوزیت می‌باشد که با اثر تضعیف سیکل حرارتی مانند ایجاد رادیکال آزاد در پلیمر مقابله می‌کند. با افزایش تعداد سیکل‌ها مکانیزم اثر تضعیف سیکل حرارتی بر مکانیزم پخت ثانویه غلبه کرده و باعث کاهش

خواص خمشی کامپوزیت‌های با آلومینیوم آندایز شده می‌شود.

8- تفاوت در ضریب انبساط حرارتی اجزای تشکیل دهنده کامپوزیت الیاف- فلز باعث تغییر حجم متفاوت در حین سیکل حرارتی شده و همین اتفاق یکی از عوامل کاهش قفل مکانیکی بین آلومینیوم و کامپوزیت پلیمری بوده و حتی باعث کاهش نیروی پیوند بین الیاف و پلیمر نیز می‌گردد.

5- مراجع

- [1] T. Sinmazçelik, E. Avcu, M. Ö. Bora, O. Çoban, A Review: Fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods, *Materials & Design*, Vol. 32, No. 7, pp. 3671-3685, 2011.
- [2] M. Sadighi, R. Alderliesten, R. Benedictus, Impact resistance of fiber-metal laminates: A Review, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 49, No. 1, pp. 77-90, 2012.
- [3] R. Alderliesten, C. Rans, R. Benedictus, The applicability of magnesium based fibre metal laminates in aerospace structures, *Composites Science and Technology*, Vol. 68, No. 14, pp. 2983-2993, 2008.
- [4] G. B. Chai, P. Manikandan, Low velocity impact response of fibre-metal laminates: A Review, *Composite Structures*, Vol. 107, pp. 363-381, 2014.
- [5] K. Singha, A short review on basalt fiber, *International Journal of Textile Science*, Vol. 1, No. 4, pp. 19-28, 2012.
- [6] T. Deák, T. Czígány, Chemical composition and mechanical properties of basalt and glass fibers: A comparison, *Textile Research Journal*, Vol. 79, No. 7, pp. 645-651, 2009.
- [7] W. X. Wang, Y. Takao, T. Matsubara, Galvanic corrosion-resistant carbon fiber metal laminates, *Proceedings of The 16th International Conference on Composite Materials*, Kyoto, Japan, July 8-13, 2007.
- [8] H. F. A. Marzuki, M. Mohamad, E. Ubaidillah, E. Ahmadhilmil, M. N. A. Nordin, Z. Abidin, M. Fadzlee, N. Roslani, Y. M. Junos, and S. Omar, Effect of anodizing on strength of carbon-fibre aluminum-laminated composites, *Advanced Materials Research*, Vol. 748, pp. 216-221, 2013.
- [9] M. Burroughs, *Effects of Thermal Cycling on Epoxy Bonded Materials*, PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology, MIT University, U.S.A, 2011.
- [10] A. A. da Costa, D. F. da Silva, D. N. Travessa, E. C. Botelho, , The effect of thermal cycles on the mechanical properties of fiber-metal laminates, *Materials & Design*, Vol. 42, pp. 434-440, 2012.
- [11] R. Eslami-Farsani, S. M. Reza Khalili, M. Najafi, Effect of thermal cycling on hardness and impact properties of polymer composites reinforced by basalt and carbon fibers, *Journal of Thermal Stresses*, Vol. 36, No. 7, pp. 684-698, 2013.
- [12] S. M. R. Khalili, M. Najafi, R. Eslami-Farsani, Effect of thermal cycling on the tensile behavior of polymer composites reinforced by basalt and carbon fibers, *Journal of Mechanics of Composite Materials*, Vol. 52, No 6, pp. 1-10, 2017.
- [13] S. Segerström, I. E. Ruyter, Effect of thermal cycling on flexural properties of Carbon-Graphite Fiber-Reinforced polymers, *Dental Materials*, Vol. 25, No. 7, pp. 845-851, 2009.
- [14] Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity), *ASTM International*, D 445 2009.
- [15] Resin, E., 828 Data Sheet, *Shell Chemical Co.*, sc, Vol. 60, 2005.
- [16] Standard Test Methods for Flexural Properties of Un-reinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, *Annual Book of ASTM Standard*, 08.01, D 790 - 00, 2000
- [17] C. L. Beyler, *Thermal Decomposition of Polymers*, M. M. Hirschler, , *SFPE handbook of fire protection engineering*, Vol. 2, pp. 111-131, 2002.
- [18] T. H. Ko, T. S. Ma, Effect of Post-Curing on the mechanical properties of carbonized phenolic resins, *Polymer composites*, Vol. 19, No. 4, pp. 456-462, 1998.
- [19] D. Kumar, M. Shukla, K. Mahato, D. Rathore, R. Prusty, B. Ray, Effect of Post-Curing on thermal and mechanical behavior of grp composites, *Proceeding of IOP Publishing*, pp. 012012, 2015.