



ارزیابی قابلیت جذب انرژی چند لایه اپوکسی-الیاف شیشه/آلومینیوم پس از قرارگیری در سیکل های گرمایشی

محمد عسکری^۱، مهرداد جوادی^{۲*}، رضا اسلامی فارسانی^۳، عبدالرضا گرانمایه^۴

۱- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران

۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران

۳- استاد، مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

۴- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران

* تهران، صندوق پستی ۴۴۳۵-۱۱۳۶۵، mjavadi@azad.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

در شرایط واقعی، سازه‌های کامپوزیتی تحت شرایط محیطی متفاوت مانند سیکل‌های حرارتی قرار می‌گیرند. هدف تحقیق حاضر، بررسی تأثیر اعمال سیکل‌های حرارتی بر قابلیت جذب انرژی چند لایه الیاف-فلز ساخته شده با پوسته آلومینیومی و هسته کامپوزیتی اپوکسی-الیاف شیشه با چیدمان‌های متفاوت الیاف شیشه می‌باشد. به همین دلیل در گام نخست، چند لایه الیاف-فلز با دو چیدمان تک جهتته $0^{\circ}/0^{\circ}/0^{\circ}/0^{\circ}$ و $90^{\circ}/90^{\circ}/90^{\circ}/90^{\circ}$ و دو چیدمان دو جهتته $+45^{\circ}/-45^{\circ}/-45^{\circ}/+45^{\circ}$ و $0^{\circ}/90^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}$ ساخته شدند. سپس، نمونه‌های ساخته شده تحت سیکل‌های حرارتی ۰، ۱، ۱۰، ۳۰، ۵۰ و ۹۰ سیکل قرار گرفتند. هر سیکل حرارتی شامل افزایش دما تا 100°C به مدت ۱۵ دقیقه، نگهداری در این دما به مدت ۵ دقیقه و خنک کردن تا دمای محیط به مدت ۱۵ دقیقه بود. پس از آن قابلیت جذب انرژی و شناسایی مکانیزم‌ها توسط آزمون ضربه، بررسی ماکروساختاری و بررسی میکروسکوپی بررسی شدند. نتایج بدست آمده نشان داد که تا ۱۰ سیکل حرارت‌دهی در چند لایه‌های الیاف-فلز با چیدمان تک جهتته قابلیت جذب انرژی بهبود یافته است و پس از آن این قابلیت روندی کاهشی داشت. کم‌ترین و بیش‌ترین حساسیت قابلیت جذب انرژی به سیکل‌های حرارتی به ترتیب در نمونه‌ها با چیدمان‌های $+45^{\circ}/-45^{\circ}/-45^{\circ}/+45^{\circ}$ و $0^{\circ}/90^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}$ مشاهده شدند. بررسی ماکروسکوپی نشان داد که پس از اعمال ۹۰ سیکل حرارتی، جدایش بین لایه‌های الیاف شیشه مکانیزم اصلی شکست در چند لایه‌های الیاف فلز بود. با بررسی میکروسکوپی فهمیده شد که سیکل‌های حرارتی بالا باعث کاهش چسبندگی بین الیاف شیشه و زمینه اپوکسی در چند لایه الیاف-فلز شده است.

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: ۲۷ فروردین ۱۴۰۱
داوری اولیه: ۱ خرداد ۱۴۰۱
پذیرش: ۲۸ خرداد ۱۴۰۱

کلیدواژگان:

چند لایه الیاف-فلز
آزمون ضربه
شرایط گرمایشی
جذب انرژی

The assessment of energy absorption capability of aluminum/epoxy-glass fibers laminates after exposure to the thermal cycling

Mohammad Askari¹, Mehrdad Javadi^{1*}, Reza Eslami-Farsani², Abdolreza Geranmayeh¹

1- Department of Mechanical Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

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

* P.O.B. 11365-4435, Tehran, Iran, mjavadi@azad.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received: 16 April 2022
First Decision: 22 May 2022
Accepted: 18 June 2022

Keywords:

Fiber Metal Laminate
Impact Test
Thermal Cycling
Energy Absorption

Abstract

In the real conditions, the composite structures set into the various environment conditions like thermal cycling. The aim of this work is to investigate the effect performing the thermal cycling on the absorbed energy capability of fibers metal laminates (FMLs) with aluminum skin and glass fibers/ epoxy composites core with the various stacking sequence of glass fibers. For this reason, in the first step, the FMLs with two unidirectional configurations ($0^{\circ}/0^{\circ}/0^{\circ}/0^{\circ}$ and $90^{\circ}/90^{\circ}/90^{\circ}/90^{\circ}$) and two bi-directional configurations ($+45^{\circ}/-45^{\circ}/-45^{\circ}/+45^{\circ}$ and $0^{\circ}/90^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}$) were fabricated. Then, the samples were aged by 0, 1, 10, 30, 50 and 90 thermal cycles. Each thermal cycle was heating the samples up to 100°C for 15 min, maintaining in this temperature for 5 min, and cooling them down to the ambient temperature for 15 min. After that, measuring the absorbed energy and characterizing the mechanisms were investigated by Charpy impact test, macrostructural method and microscopic analysis. The obtained results showed, up to 10 thermal cycles in the FMLs with unidirectional configurations, the absorbed energy capability has improved. After that, it had the reducing trend. The minimum and maximum sensitivity of absorbed energy capability in the thermal cycling were seen into the samples with the configurations of $+45^{\circ}/-45^{\circ}/-45^{\circ}/+45^{\circ}$ and $0^{\circ}/90^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}$, respectively. The macrostructural investigation was showed, the delamination between fibers plies was the main failure mechanism in the FMLs, after performing 90 thermal cycles. By using the microscopic analysis was found that the thermal cycling caused to reduce the adhesion between glass fibers and epoxy matrix into the FML.

Please cite this article using:

M. Askari, M. Javadi, Reza Eslami-Farsani, A. Geranmayeh, The assessment of energy absorption capability of aluminum/epoxy-glass fibers laminates after exposure to the thermal cycling, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 9, No. 2, pp. 30- 40, 2022 (in Persian). <https://www.doi.org/10.22034/IJME.2022.157560>

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

۱- مقدمه

بررسی‌های انجام شده در طی دهه‌های اخیر رشد فزاینده‌ای در توسعه و ارتقاء سازه‌های کامپوزیتی به دلیل داشتن خواصی مانند استحکام و مدول بالا به همراه وزن کم را نشان می‌دهد [۱]. یکی از این سازه‌های توسعه یافته چند لایه الیاف/فلز^۱ می‌باشد. این سازه‌های کامپوزیتی از قرار گرفتن لایه‌های فلزی و کامپوزیت زمینه پلیمری در کنار همدیگر تشکیل شده‌اند. در میان انواع فلزات، آلیاژهای آلومینیوم، تیتانیوم و منیزیم بدلیل داشتن چگالی کم در مقایسه با دیگر فلزات آلیاژی مانند فولادها بسیار در این سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲]. از جمله لایه‌های کامپوزیتی بسیار پرکاربرد در این سازه‌ها کامپوزیت‌های اپوکسی/الیاف شیشه، اپوکسی الیاف کربن و اپوکسی/الیاف کولار می‌باشند [۳-۵]. چندلایه‌های الیاف/فلز به دلیل استفاده هم‌زمان از خواص فلزات و کامپوزیت‌ها دارای مزایایی مانند استحکام بالا، مقاومت در برابر خستگی و چقرمگی شکست بالا می‌باشند که باعث رشد و توسعه آن‌ها در صنایع مختلف شده است. از جمله کاربردهای چند لایه الیاف-فلز، قابلیت استفاده آن‌ها در در بدنه کشتی‌ها، قایق‌ها، برخی از قطعات هواپیما و دیگر وسایل نقلیه موتوری اشاره نمود که در مقایسه با فلزات آسیب کمتری در حین برخورد با اشیاء یا جانداران در آن‌ها ایجاد می‌شود. به همین دلیل محققان زیادی برای بهبود خواص مکانیکی این سازه‌ها از جمله بهبود خواص مقاومت به ضربه آن‌ها در حال پژوهش هستند.

به عنوان مثال، ولت و کرول [۶] به بررسی تأثیر نسبت هسته کامپوزیتی اپوکسی-الیاف شیشه به پوسته آلومینیومی بر رفتار ضربه لایه‌های الیاف-فلز آلومینیوم / اپوکسی-الیاف شیشه پرداخته و نتایج بدست آمده را با لایه‌های آلومینیوم 2024 و کامپوزیت‌های پلی‌اتیلن ایمین^۲-الیاف کربن مقایسه کردند. نتایج بدست آمده نتایج آزمون ضربه سرعت پایین (در شرایط یکسان) نشان داد که مقاومت به ضربه چند لایه الیاف-فلز مذکور ۱۵٪ نسبت به فلز آلومینیوم بیش‌تر می‌باشد. همچنین میزان مقاومت به ضربه با افزایش نسبت هسته به پوسته به دلیل حساسیت به نرخ کرنش الیاف شیشه بیش‌تر شد. مویکا و همکارانش [۷] خصوصیات ضربه چندلایه‌های الیاف-فلز از جنس آلومینیوم 2024-T3 و منیزیم AZ31B-H24 با پایه پلی‌پروپیلن خود تقویت شونده^۳ را بررسی و با هم مقایسه کردند. این تحقیق روی بررسی خواص ضربه و توضیح تفاوت

بین پاسخ‌های ضربه این مواد متمرکز شده بود. همچنین به منظور مقایسه، آزمون ضربه روی کامپوزیت پایه پلی‌پروپیلن نیز انجام شد. نتایج نشان داد که چند لایه‌های الیاف-فلز با پوسته آلومینیومی ظرفیت اتلاف انرژی و مقاومت ضربه بالاتری نسبت به چندلایه‌های الیاف-فلز با پوسته منیزیمی را دارا هستند.

فان و همکارانش [۸] در سال ۲۰۱۱ در مطالعه‌ای به مدل‌سازی عددی عملکرد شکست در چندلایه‌های الیاف-فلز تحت بارگذاری ضربه کم سرعت پرداخته‌اند. در این مقاله، اثر نیرو-جابجایی، حالت‌های تغییر شکل و شکست بعد از آن برای اعتبارسنجی مجموعه‌ای از مدل‌های عددی مورد استفاده قرار گرفت.

پارنانن و همکارانش [۹] در مطالعه‌ای به بررسی کاربرد منیزیم AZ31B-H24 در چندلایه‌های الیاف-فلز تحت قالب تحقیقات تجربی آزمون ضربه پرداخته‌اند. آزمون ضربه افتان وزنه بر روی چندلایه‌های الیاف-فلز با پایه‌ی فلز منیزیم AZ31B-H24 و چندلایه اپوکسی-الیاف شیشه/آلومینیوم انجام شد. نتایج نشان داد که ترک در چندلایه‌های الیاف-فلز با لایه‌های فلزی بر پایه منیزیم در مقایسه با اپوکسی-الیاف شیشه/آلومینیوم با انرژی ضربه پایین‌تری ایجاد شده و آسیب گسترده‌تری صورت گرفته است.

پل و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۱۵، رفتار ضربه چند لایه الیاف-فلز تقویت شده با الیاف شیشه و نانوذرات رس را مورد بررسی قرار دادند. نوع آزمون ضربه در این کار پژوهشی، ضربه سرعت بالا بود. نتایج بدست آمده نشان داد که در نمونه حاوی ۳ درصد وزنی نانورس سرعت ضربه ۱۳۴ m/s می‌باشد که نزدیک حد بالستیک بود. در حالیکه در نمونه حاوی ۱۰ درصد وزنی نانورس سرعت ضربه ۱۶۹ m/s گزارش شد.

مالینگام و همکاران [۱۱] رفتار ضربه چارپی چند لایه الیاف-فلز با پوسته آلومینیومی و هسته هیبریدی الیاف شیشه/کنف با چیدمان‌های متفاوت مورد بررسی قرار دادند. نتایج بدست آمده نشان داد که استفاده از چیدمان با زاویه الیاف $\pm 45^\circ$ خواص ضربه را بهبود داد، اما چیدمان با زاویه الیاف $0^\circ/90^\circ$ کمترین مقاومت به ضربه را داشت. ویثرا و همکاران [۱۲] چند لایه الیاف فلز با پوسته آلومینیومی و هسته اپوکسی/الیاف طبیعی سیسال را ساختند. هدف از این کار پژوهشی ساخت چند لایه الیاف-فلز به منظور کاربرد در قطعه هواپیما با قیمت ارزان و خواص مکانیکی مناسب بود. بررسی آزمون ضربه چارپی این چند لایه الیاف-فلز نشان داد که قابلیت جذب انرژی آن 142 j/mm^2 می‌باشد.

¹ Fiber metal laminate² Polyethylenimine³ Self-reinforced polypropylene

داشته‌اند.

با توجه به مطالب بیان شده، تحقیقات لازم به منظور بررسی تأثیر شرایط محیطی مختلف بر خواص مکانیکی چند لایه الیاف/فلز بسیار کم می‌باشد. در این کار تحقیقاتی سعی شده است تا تأثیر سیکل‌های گرمایشی بر خواص ضربه چند لایه الیاف/فلز مورد بررسی قرار گیرد. از کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه به عنوان هسته و از آلومینیوم ۲۰۲۴ به عنوان پوسته چند لایه الیاف/فلز استفاده شده است. سیکل حرارتی اعمال شده در محدوده دمایی 100°C - 25°C می‌باشد. در واقع نتایج این کار تحقیقاتی می‌تواند معیاری برای ساخت چند لایه الیاف-فلز با چیدمان مناسب به منظور پایداری خواص ضربه تحت شرایط گرمایشی با توجه به نوع کاربرد طراحی شده باشد.

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد اولیه

به منظور ساخت سازه چند لایه الیاف/فلز از رزین اپوکسی بیسفنول A^۲ با نام تجاری اپوکسی Epon 828 و هاردنر پلی‌آمینی TETA^۳ محصول شرکت KER کره جنوبی استفاده شده است. نسبت اختلاط بیان شده توسط این شرکت برای این رزین و هاردنر ۱۰۰ به ۱۳ می‌باشد. همچنین از الیاف شیشه با بافت تک جهته^۴ با چگالی سطحی 400 g/m^2 محصول شرکت لینتکس^۵ (چین) استفاده شد. لازم به ذکر است از آلومینیوم ۲۰۲۴ (تحت عملیات حرارتی T3 قرار گرفته) با ضخامت 0.5 mm و با ابعاد $20 \times 20\text{ cm}^2$ به عنوان لایه‌های فلزی در چند لایه الیاف/فلز استفاده شده است. همچنین از هیدروکسید سدیم، پتاسیم‌دی‌کرومات و اسید سولفوریک ۹۸ درصد (عرضه شده توسط شرکت مواد شیمیایی دکتر مجللی^۶-ایران) به منظور اصلاح سطح ورقه‌های آلومینیوم استفاده شد.

۲-۲- اصلاح سطح ورقه‌های آلومینیوم

به منظور چسبندگی بهتر کامپوزیت به لایه‌های آلومینیومی نیاز است که رزین زمینه به داخل حفرات آلومینیوم نفوذ کرده تا چسبندگی مناسب ایجاد نماید. بدین منظور در این کار پژوهشی از دو روش اصلاح مکانیکی و شیمیایی FPL^۷ به صورت هم‌زمان استفاده شد. شایان ذکر است که این روش توسط دیگر محققان

با توجه به کارهای پژوهشی معرفی شده می‌توان دریافت که توسعه و مطالعه روی ویژگی‌های چند لایه الیاف/فلز از دیدگاه تجربی و محاسباتی بسیار انجام شده است. همچنین بهینه‌سازی خواص از دیدگاه موادی با افزودن مواد جدید از جمله نانومواد انجام شده است. این بررسی‌ها نشان می‌دهد که بیشتر این مطالعات در شرایط محیطی و در دمای اتاق انجام شده است. اما همانگونه که می‌دانیم قطعات مورد استفاده در صنایع مختلف از جمله هوافضا ممکن است در شرایط دمایی (سرمایشی و گرمایشی) و محیطی (آب دریا، شرایط رطوبتی) متفاوتی قرار گیرند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که مطالعات اندکی به منظور بررسی تأثیر شرایط محیطی مختلف بر خواص چند لایه الیاف/فلز انجام شده است. به عنوان مثال نجفی و همکاران [۱۳] تأثیر پیرسازی گرمایی^۱ بر روی خواص خمشی چند لایه الیاف/فلز حاوی درصد‌های متفاوت نانوذرات رس را انجام دادند. این محققان چند لایه الیاف/فلز حاوی نانوذرات رس را به مدت ۵ هفته در دمای 130°C قرار دادند. بیشترین کاهش در استحکام خمشی و مدول خمشی به ترتیب، $1/55$ و $0/88$ درصد گزارش شد.

عبداللهی و اسلامی [۱۴] رفتار خمشی چند لایه الیاف/فلز حاوی چیدمان‌های مختلف الیاف بازالت و شیشه پس از قرار دادن در 55°C سیکل گرمایشی در محدوده دمایی 115°C - 25°C را بررسی کردند. داده‌های گزارش شده نشان داد که چندلایه الیاف/فلز حاوی الیاف بازالت و شیشه (نمونه‌های بدون هیبرید شدن) دارای بیش‌ترین و کم‌ترین مدول الاستیک و استحکام خمشی بودند. همچنین ساختارهای هیبریدی بررسی شده دارای خواصی بین این دو سازه بودند. نتایج بیان شده نشان می‌دهد که پس از 55 سیکل گرمایشی مدول الاستیک و استحکام خمشی روندی کاهشی دارند. با افزایش درصد الیاف شیشه نسبت به الیاف بازالت در این سازه‌های چند لایه الیاف/فلز، این روند کاهشی شدت بیشتری یافته است، به طوری که در نمونه حاوی ۱۰۰ درصد الیاف شیشه بیشترین کاهش در خواص مشاهده شده است.

داکوستا و همکاران [۱۵] تأثیر سیکل گرمایشی در محدوده دمایی 50°C - تا ۸۰ بر روی استحکام برشی و کششی چند لایه الیاف/فلز را بررسی کردند. سیکل‌های گرمایشی اعمال شده ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ سیکل بودند. نتایج گزارش شده نشان داد که سیکل‌های گرمایشی اعمال شده در این محدوده دمایی تأثیر بسیار ناچیزی بر استحکام برشی و کششی چند لایه الیاف/فلز

^۱ Thermal aging

^۲ Bisphenol A

^۳ Triethylenetetramine (TETA)

^۴ Unidirectional (UD)

^۵ Lintex

^۶ Dr. Mojallali

^۷ Forest products laboratory

ورقه‌های آلومینیوم اصلاح شده به رزین آغشته شدند. به مدت ۳ دقیقه زمان داده شد تا رزین به داخل لایه‌های متخلخل ایجاد شده ناشی از اصلاح سطح نفوذ نماید. در ادامه پارچه‌های تک جهت الیاف شیشه آغشته به رزین اپوکسی بر روی سطح آلومینیوم قرار داده شدند. نوع چیدمان پارچه‌های تک جهت به صورت $0^{\circ}/0^{\circ}/0^{\circ}/0^{\circ}$, $90^{\circ}/90^{\circ}/90^{\circ}/90^{\circ}$, $+45^{\circ}/-45^{\circ}/-45^{\circ}/+45^{\circ}$ و $0^{\circ}/90^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}$ می‌باشد که در شکل ۲ نشان داده شده است. سپس، لایه بالایی آلومینیوم بر روی پارچه الیاف شیشه قرار داده شد.

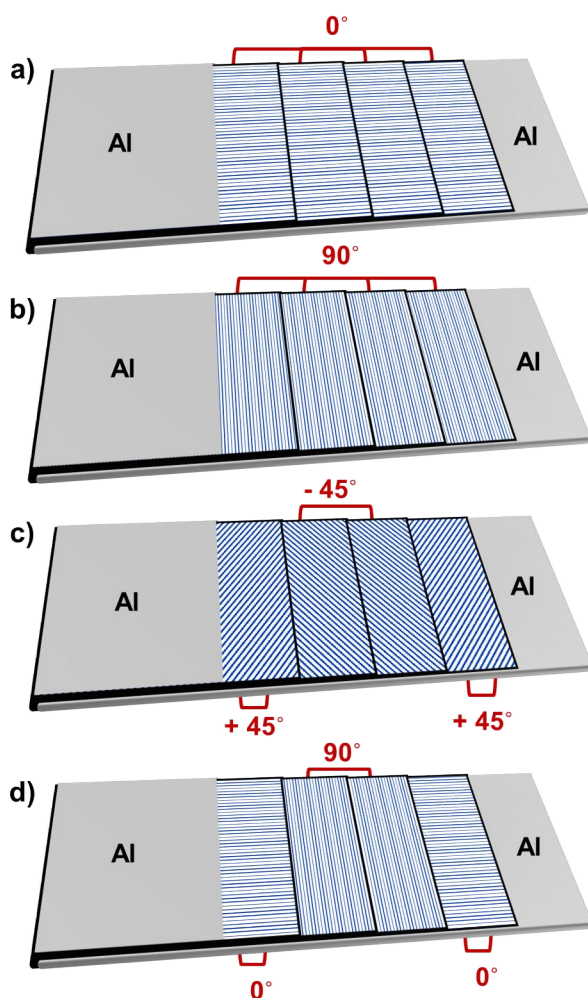


Fig. 2 The various configuration of glass fibers into the core of FMLs
شکل ۲ انواع چیدمان الیاف شیشه در هسته چند لایه الیاف-فلز

سپس چند لایه الیاف/فلز در داخل قالب قرار داده و توسط فیکسچرهایی محکم شد تا در حین پرس لایه‌ها جابه‌جا نشوند. پس از قرار دادن قسمت بالایی قالب، از دستگاه پرس با فشار ۴۰ bar استفاده شد. استفاده از پرس، به منظور حذف حباب‌های تشکیل شده، نفوذ رزین به ساختار متخلخل آلومینیوم و

بهینه شده است که در ادامه روند آن بیان خواهد شد [۱۶، ۱۷]. در گام نخست، سطوح آلومینیوم ۲۰۲۴ توسط استون شست‌وشو داده شد. سپس، توسط کاغذ سمباده ۶۰ و با زاویه‌های $\pm 45^{\circ}$ سمباده زده شدند. در گام بعدی، آلومینیوم در محلول یک مولار هیدروکسید سدیم قرار داده شد تا سطح آن اندکی سیاه شود. این عمل به منظور برداشته شدن آلودگی‌های سطحی و همچنین لایه محافظ روی سطح آلومینیوم می‌باشد. پس از آن آلومینیوم از محلول خارج و توسط آب سرد شست و شو داده شد.

در ادامه، ۳۵۰ گرم اسید سولفوریک در یک لیتر آب رقیق شد. در ظرفی دیگر مقدار ۳۵ گرم پتاسیم دی‌کرومات در یک لیتر آب مقطر حل شد. در ادامه دو محلول به یکدیگر اضافه شدند و دمای محلول بر روی 60°C تنظیم شد. پس از آن ورق‌های آلومینیوم به داخل محلول FPL انداخته شده و به مدت ۳۰ min در این محلول غوطه‌ور شدند. پس از آن، از محلول خارج و بلافاصله با آب سرد شسته شدند. شکل ۱ تصویر میکروسکوپی سطح آلومینیوم پس از اصلاح سطح شیمیایی/مکانیکی نشان می‌دهد.

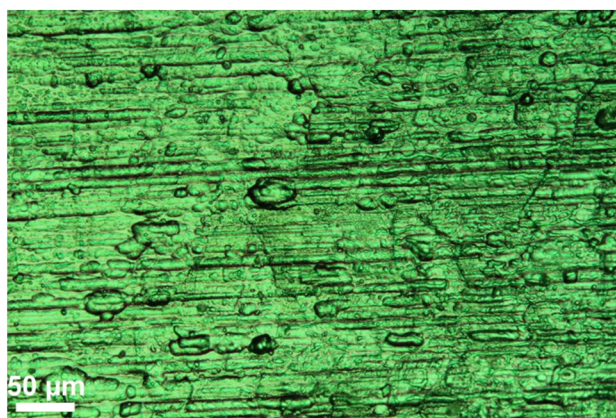


Fig. 1 The optical microscope image from surface modified aluminum by FPL method

شکل ۱ تصویر میکروسکوپ نوری از آلومینیوم اصلاح شده با روش FPL

۲-۳- ساخت نمونه

در این کار پژوهشی نوع چیدمان چند لایه‌های الیاف فلز از نوع 2/1 می‌باشد که به روش لایه‌گذاری دستی^۱ ساخته شدند. به عبارت دیگر هسته آن کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه می‌باشد که بین دو لایه آلومینیوم قرار گرفته است. در ابتدا، برای جلوگیری از چسبیدن قالب به نمونه‌ها تمامی سطوح قالب توسط واکس جداکننده پوشش داده شدند. در گام بعدی،

¹ Hand lay-up

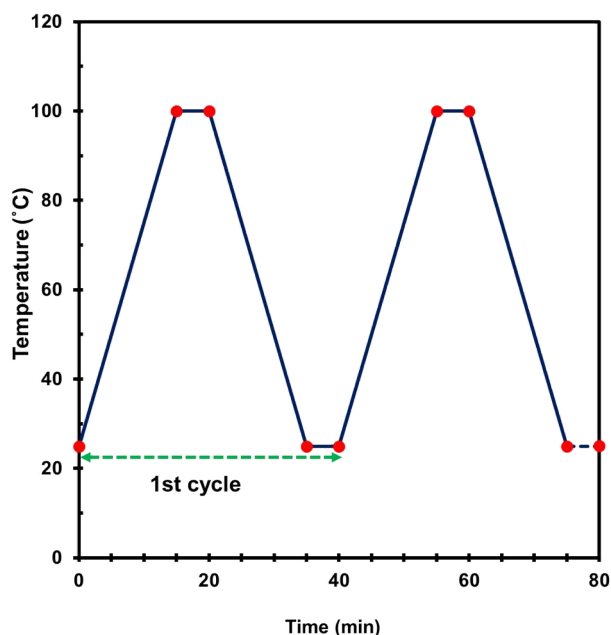


Fig. 4 Thermal cycle profile

شکل ۴ روند سیکل حرارتی

شایان ذکر است TC نشان دهنده نمونه سیکل داده شده و اعداد پس از آن نشان‌دهنده تعداد سیکل‌های گرمایشی اعمال شده می‌باشد.

۲-۵- مشخصه‌یابی

به منظور بررسی خواص ضربه چندلایه‌های الیاف/فلز ساخته شده از آزمون ضربه چارپی مطابق استاندارد ISO 179-1 با ابعاد $70 \times 10 \text{ mm}^2$ استفاده شد. شایان ذکر است نمونه‌های ساخته شده نمونه‌های بدون شیار می‌باشند. طول آونگ و سرعت لحظه برخورد گزارش شده توسط سازنده دستگاه، به ترتیب 750 mm و $5/23 \text{ mm/s}$ بود. به منظور حصول نتایج دقیق برای هر نمونه، آزمون ضربه پنج مرتبه تکرار شد و نتایج بدست آمده به صورت میانگین گزارش شد. همچنین جهت بررسی سطح شکست از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) مدل TeScan-Mira III ساخت کشور چک استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی رفتار ضربه

شکل ۵ داده‌های حاصل از آزمون ضربه چارپی نمونه‌های چند لایه الیاف-فلز با چیدمان الیاف $0^\circ/0^\circ/0^\circ$ در سیکل‌های گرمایشی متفاوت را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل می‌توان فهمید که نمونه بدون سیکل حرارتی دارای قابلیت جذب

دستیابی به ضخامت یکنواخت در نمونه‌های $25 \times 20 \text{ cm}^2$ می‌باشد. پس از پخت چند لایه الیاف/فلز در مدت زمان یک روز، قالب از زیر دستگاه پرس خارج و نمونه از قالب درآورده شد. به منظور پخت کامل، نمونه به مدت ۷ روز با توجه به توصیه شرکت تولید کننده رزین، در دمای محیط قرار داده شد. سپس نمونه‌های ساخته شده توسط دستگاه واترجت با ابعاد $70 \times 10 \text{ mm}^2$ به منظور آماده‌سازی نمونه‌های آزمون ضربه برش داده شدند (شکل ۳). نسبت الیاف شیشه به رزین اپوکسی در تمامی سازه‌های ساخته شده ۶۰ به ۴۰ درصد حجمی می‌باشد.

۲-۴- سیکل گرمایشی

به منظور بررسی تأثیر سیکل‌های گرمایشی بر روی خواص ضربه چند لایه الیاف/فلز از آون ساخت شرکت سرمایه‌ش ۱ کشور ایران مدل ATM 7004-37 استفاده شد. همچنین به منظور کنترل دقیق دمای سطح نمونه‌ها از ترموکوپل استفاده شد. برای این منظور ابتدا نمونه‌ها داخل آون قرار داده شدند و ۱۵ min زمان داده شد تا دمای آن‌ها از دمای محیط به دمای 100°C برسد. سپس نمونه‌ها به مدت ۵ min در این دما نگهداری شدند. پس از آن نمونه‌ها از آون خارج و در دمای محیط به مدت ۱۵ min رها شدند تا دمای آن‌ها به دمای 25°C برسد. نحوه انجام این سیکل حرارتی به صورت شماتیک در شکل ۴ آورده شده است. سیکل‌های گرمایشی اعمال شده بر نمونه‌ها به همین صورت تکرار شد. تعداد سیکل‌های انتخاب شده برای بررسی تأثیر آن‌ها بر خواص ضربه، ۱، ۱۰، ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۹۰ سیکل براساس مطالعات انجام در کارهای مشابه انتخاب شدند [۱۸]. لازم به ذکر است که نمونه‌ای بدون سیکل به منظور مقایسه نیز در نظر گرفته شد. نمونه بدون سیکل با مشخصه RT، و نمونه‌های سیکل داده شده با مشخصه‌های TC1، TC10، TC30، TC50، TC70 و TC90 نام‌گذاری شدند.



Fig. 3. The fabricated aluminium/glass fibers-epoxy FMLs

شکل ۳ چندلایه الیاف فلز اپوکسی-الیاف شیشه/آلومینیوم ساخته شده

² Field emission scanning electron microscope

¹ Sarmayesh

نهایت منجر به بهبود خواص مکانیکی می‌شود. با توجه به بررسی‌های انجام شده دلیل کاهش قابلیت جذب انرژی در این ساختار را می‌توان مرتبط با دو پارامتر دانست. پارامتر نخست، شکستن اتصالات ضعیف در حین حرارت‌دهی می‌باشد. به عبارت دیگر با ادامه حرارت‌دهی اتصالات ضعیف در ساختار زمینه اپوکسی دچار تجزیه حرارتی شده که موجب کاهش خواص مکانیکی زمینه اپوکسی و در نهایت سازه می‌شود [۲۰]. پارامتر دوم را می‌توان به ضریب انبساط حرارتی اجزای چند لایه الیاف-فلز مرتبط دانست [۲۱]. در چند لایه الیاف-فلز، فلز آلومینیوم، رزین زمینه و الیاف تقویت‌کننده دارای ضریب انبساط حرارتی متفاوت می‌باشند. اعمال سیکل‌های حرارتی باعث تغییر طول در هر یک از این اجزا می‌شود که در نهایت به دلیل یکسان نبودن ضریب انبساط حرارتی، در ساختار چند لایه الیاف-فلز تنش‌های پسماند ایجاد می‌شود. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که این تنش‌های پسماند باعث شکل‌گیری میکروترک یا پیشروی میکروترک‌ها در حین بارگذاری‌های مکانیکی می‌شود که در نهایت باعث کاهش قابلیت خواص مکانیکی از جمله جذب انرژی سازه می‌شود [۲۲].

شکل ۶ رفتار ضربه چارپی چند لایه الیاف-فلز با چیدمان $90^\circ/90^\circ/90^\circ/90^\circ$ را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل می‌توان فهمید که با تغییر لایه‌چینی قابلیت جذب انرژی این چند لایه الیاف فلز نسبت به نمونه با چیدمان قبلی کاهش یافته است.

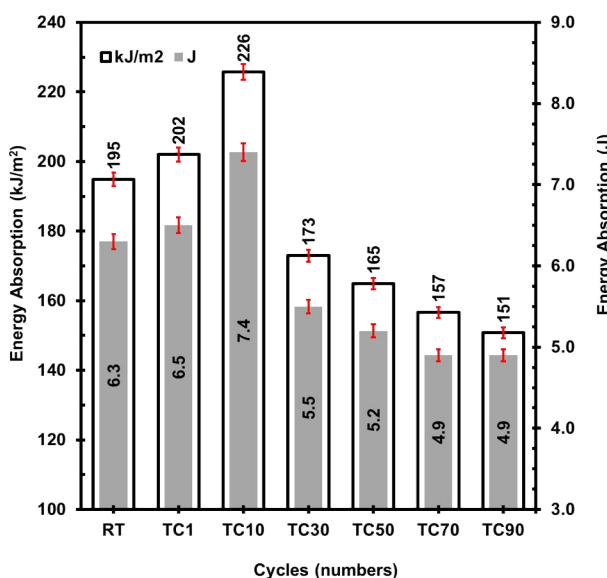


Fig. 6 The effect of thermal cycling on the impact behavior of FMLs with $90^\circ/90^\circ/90^\circ/90^\circ$ configuration.

شکل ۵ تأثیر سیکل حرارتی بر رفتار ضربه چند لایه الیاف-فلز با چیدمان $0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ$

به طوری که میزان جذب انرژی از 450 kJ/m^2 به 195 kJ/m^2

می‌باشد. با قرارگیری این نمونه در یک سیکل گرمایشی، قابلیت جذب آن افزایش یافته و به 505 kJ/m^2 رسید. این بدین معنی است که تنها با یک سیکل گرمایشی میزان قابلیت جذب انرژی ۱۲/۲ درصد بهبود یافته است. با اعمال ۱۰ سیکل گرمایشی، این روند ادامه داشته و میزان بهبود به $13/3$ درصد رسید.

پس از اعمال تعداد سیکل‌های گرمایشی بیش‌تر قابلیت جذب انرژی در این سازه روندی کاهشی دارد. به صورتی که در سیکل‌های ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۹۰، داده‌های بدست آمده به ترتیب 478 kJ/m^2 ، 470 kJ/m^2 ، 456 kJ/m^2 و 448 kJ/m^2 می‌باشند. به عبارت دیگر، در سیکل‌های گرمایشی بیش‌تر قابلیت جذب انرژی کاهش یافته است، به طوری که در ۹۰ سیکل به کمترین مقدار خود می‌رسد. با مقایسه نمونه بدون سیکل حرارتی و نمونه با ۹۰ سیکل حرارتی می‌توان مشاهده کرد که کاهش قابلیت جذب انرژی پس از ۹۰ سیکل تنها ۰/۴۵ درصد می‌باشد. دلیل بهبود قابلیت جذب انرژی تا ۱۰ سیکل را می‌توان به ایجاد اتصالات عرضی در باقیمانده در ساختار زمینه پلیمری مرتبط دانست. با توجه به کار دیگر محققان [۱۹]، تنها بخشی از اتصالات عرضی در زمینه در حین فرآیند پخت ایجاد می‌شود و بخشی از آن در ساختار پلیمر باقی می‌ماند.

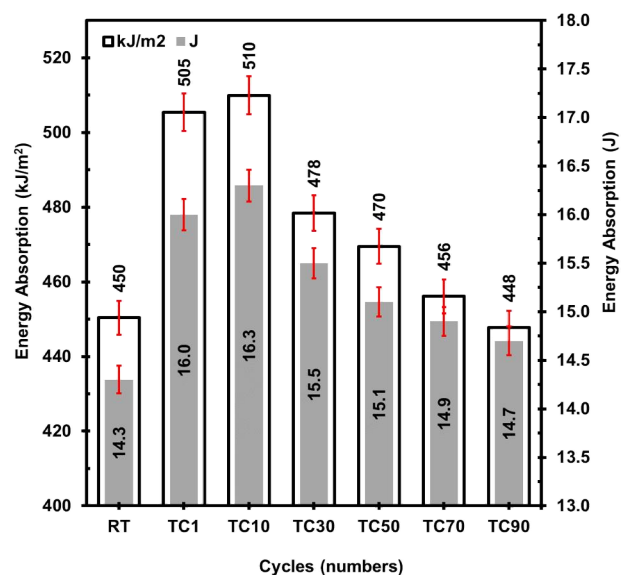


Fig. 5 The effect of thermal cycling on the impact behavior of FMLs with $0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ$ configuration.

شکل ۵ تأثیر سیکل حرارتی بر رفتار ضربه چند لایه الیاف-فلز با چیدمان $0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ$

افزایش دما و اعمال سیکل‌های حرارت‌دهی، سرعت واکنش را افزایش داده و باعث ایجاد دیگر اتصالات عرضی می‌شود که در

در زمان طولانی‌تری ایجاد شده است. کاهش نفوذ حرارتی همچنین می‌تواند بر میزان تجزیه حرارتی ساختار اپوکسی نیز تأثیرگذار باشد. به همین دلیل فرآیند تجزیه حرارتی در زمان طولانی‌تری (تعداد سیکل‌های بالاتر) فعال شده است.

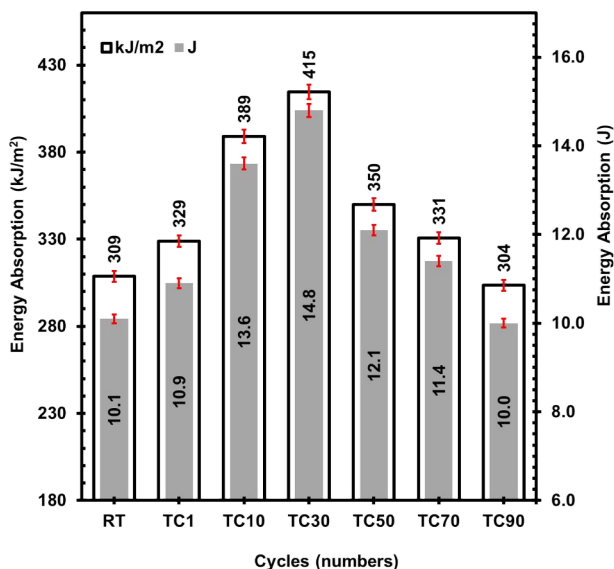


Fig. 7 The effect of thermal cycling on the impact behavior of FML with $+45^\circ/-45^\circ/-45^\circ/+45^\circ$ configuration.

شکل ۷ تأثیر سیکل حرارتی بر رفتار ضربه چند لایه الیاف- فلز با چیدمان $+45^\circ/-45^\circ/-45^\circ/+45^\circ$

داده‌های بدست آمده پس از ۷۰ سیکل حرارتی نشان می‌دهد که قابلیت جذب انرژی نسبت به نمونه بدون سیکل حرارتی ۷/۱ درصد بهتر می‌باشد. این بدین معنی است که تأثیر تجزیه حرارتی و متفاوت بودن ضریب انبساط حرارتی اجزای چند لایه الیاف- فلز کمترین مقدار می‌باشد. به عبارت دیگر چیدمان $+45^\circ/-45^\circ/-45^\circ/+45^\circ$ بیش‌ترین مقاومت در برابر افت خواص ناشی از حرارت را در چند لایه الیاف- فلز ایجاد کرده است.

شکل ۸ رفتار ضربه چند لایه الیاف- فلز با چیدمان $0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ$ تحت سیکل‌های حرارتی متفاوت نشان می‌دهد. در نمونه بدون سیکل حرارتی انرژی جذب شده 353 kJ/m^2 بدست آمد که نسبت به نمونه $+45^\circ/-45^\circ/-45^\circ/+45^\circ$ (نمونه با چیدمان دو جهته)، $14/4$ درصد قابلیت جذب انرژی بیش‌تری دارد. با اعمال سیکل‌های حرارتی می‌توان مشاهده نمود که قابلیت جذب انرژی در تمامی سیکل‌ها روندی کاهشی دارد، به طوری که پس از ۹۰ سیکل حرارتی، $39/7$ درصد میزان قابلیت جذب انرژی کاهش یافته است. این نشان می‌دهد که این چیدمان بیش‌ترین حساسیت را نسبت به سیکل‌های گرمایشی

رسیده است. مشابه چیدمان $0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ$ با حرارت‌دهی چند لایه الیاف- فلز با چیدمان $90^\circ/90^\circ/90^\circ/90^\circ$ ماکزیمم قابلیت جذب انرژی در سیکل‌دهی ۱۰ سیکل بدست آمد. میزان بهبود جذب انرژی در این تعداد سیکل $15/9$ درصد می‌باشد. این نشان‌دهنده این است که تأثیر حرارت‌دهی بر این چیدمان نسبت به چیدمان $0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ$ بیش‌تر است. به عبارت دیگر بهبود خواص زمینه، بر این چیدمان تأثیر بیش‌تری بر قابلیت جذب انرژی داشته است. با ادامه سیکل‌دهی در چند لایه الیاف- فلز با چیدمان $90^\circ/90^\circ/90^\circ/90^\circ$ قابلیت جذب انرژی به شدت کاهش یافت، به گونه‌ای که می‌توان بیان کرد حرارت‌دهی در تعداد سیکل‌های بالا باعث کاهش شدید خواص در حدود $22/6$ درصد شده است.

این بدان معنی است که نمونه با این چیدمان پس از ۹۰ سیکل حرارتی، تنها $77/4$ درصد از قابلیت جذب انرژی اولیه خود را دارا می‌باشد. دلیل این کاهش شدید در خواص را می‌توان به نفوذ حرارتی در این چیدمان مرتبط دانست [۲۳]. این بدین معنی است که با تغییر چیدمان میزان حرارت نفوذ یافته در ساختار بیش‌تر شده و در نتیجه میزان تخریب زمینه نیز افزایش یافته است که منجر به کاهش شدید قابلیت جذب انرژی شده است. این تغییر رفتار بخاطر تأثیر الیاف سرامیکی شیشه می‌باشد. زیرا الیاف سرامیکی شیشه قابلیت انتقال حرارت کمی دارند. بنابراین این الیاف می‌توانند، مانع انتقال حرارت به رزین زمینه در قسمت‌های داخلی شوند. تغییر چیدمان می‌تواند باعث تغییر رفتار انتقال حرارت در کامپوزیت شود. به گونه‌ای که می‌توان بیان کرد در چیدمان $90^\circ/90^\circ/90^\circ/90^\circ$ الیاف شیشه تأثیر کمتری بر کاهش میزان انتقال حرارت داشته‌اند. بنابراین میزان تجزیه حرارتی زمینه در این چیدمان افزایش یافته است که در نهایت موجب کاهش خواص ضربه در آن شده است.

شکل ۷ رفتار ضربه چند لایه الیاف- فلز با چیدمان $+45^\circ/-45^\circ/-45^\circ/+45^\circ$ تحت سیکل‌های گرمایشی متفاوت نشان می‌دهد. قابلیت جذب انرژی بدست آمده برای نمونه بدون سیکل حرارتی 309 kJ/m^2 می‌باشد. این نشان‌دهنده این است که رفتار ضربه این چیدمان نسبت به چیدمان $0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ$ ضعیف‌تر و از چیدمان $90^\circ/90^\circ/90^\circ/90^\circ$ قوی‌تر است. با توجه به این شکل می‌توان فهمید که بیش‌ترین قابلیت جذب انرژی در ۳۰ سیکل حرارتی بدست آمده است. این نشان‌دهنده این است که چیدمان $+45^\circ/-45^\circ/-45^\circ/+45^\circ$ باعث کاهش میزان نفوذ حرارت به لایه‌های داخلی کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه شده است. به همین دلیل اتصالات عرضی باقیمانده در زمینه اپوکسی

توجه به شکل ۹- b می‌توان مشاهده کرد که پس از انجام ۱۰ سیکل گرمایشی رفتار شکست تغییر کرده و مکانیزم غالب شکست الیاف می‌باشد. به عبارت دیگر پدیده جدایش بین پوسته فلزی و هسته کامپوزیتی مشاهده نمی‌شود که این نشانه بهبود خواص مکانیکی در فصل مشترک آلومینیوم/کامپوزیت می‌باشد.



Fig. 9 The microstructural image from FMLs with the $0^{\circ}/0^{\circ}/0^{\circ}$ configuration under the various thermal cycling; a) 0, b) 10, c) 50, d) 90 $0^{\circ}/0^{\circ}/0^{\circ}$ شکل ۹ تصویر میکروساختاری چند لایه الیاف- فلز با چیدمان $0^{\circ}/0^{\circ}/0^{\circ}$ تحت سیکل‌های حرارتی متفاوت: (a) 0, (b) 10, (c) 50, (d) 90

دلیل این بهبود در فصل مشترک را می‌توان مرتبط با ایجاد اتصالات عرضی بیشتر در زمینه اپوکسی و بهبود خواص مکانیکی آن دانست. با توجه به شکل ۹- c می‌توان فهمید که پس از اعمال ۵۰ سیکل حرارتی، رفتار شکست چند لایه الیاف- فلز تغییر کرده و دوباره مشابه رفتار نمونه بدون سیکل حرارتی دارد. این بدین معنی است که مکانیزم‌های تجزیه حرارتی زمینه و ایجاد تنش پسماند به خاطر اعمال سیکل‌های حرارتی فعال

دارد. به نظر می‌رسد که پارامتر دیگری در رفتار مقاومت حرارتی چند لایه‌های الیاف- فلز تأثیرگذار باشد. با توجه به چیدمان‌های متفاوت می‌توان فهمید که چیدمان $0^{\circ}/90^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}$ کم‌ترین میزان تقارن در ساختار را نسبت به دیگر چیدمان‌ها دارد.

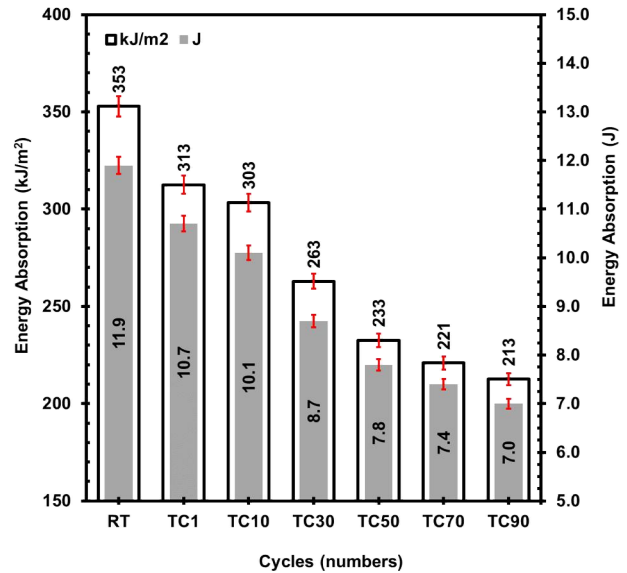


Fig. 8 The effect of thermal cycling on the impact behavior of FML s with $0^{\circ}/90^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}$ configuration.

شکل ۸ تأثیر سیکل حرارتی بر رفتار ضربه چند لایه الیاف- فلز با چیدمان $0^{\circ}/90^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}$

این امر باعث می‌شود تا به دلیل متفاوت بودن ضریب انبساط حرارتی اجزای تشکیل‌دهنده چند لایه الیاف- فلز، تنش پسماند بیشتری در سازه ایجاد شود. این کاهش تقارن باعث ایجاد تنش‌های پسماند بین لایه‌های کامپوزیتی نیز می‌شود. از طرفی، وقتی الیاف با جهت‌های متفاوت روی یکدیگر قرار می‌گیرند، باعث اعمال نیرو به یکدیگر در جهات متفاوت می‌شوند که منجر به کاهش خواص استحکامی هسته کامپوزیتی می‌شود. با توجه به دلایل بیان شده، کاهش تقارن در هسته کامپوزیتی می‌تواند دلیل کاهش مقاومت در برابر ضربه در این سازه نسبت به دیگر چیدمان‌ها باشد.

۲-۳- بررسی میکروساختاری

شکل ۹ رفتار شکست چند لایه‌های الیاف فلز با چیدمان $0^{\circ}/0^{\circ}/0^{\circ}/0^{\circ}$ تحت سیکل‌های ۰، ۱۰، ۵۰ و ۹۰ سیکل را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل می‌توان مشاهده کرد که در نمونه بدون سیکل حرارتی، پس از آزمون ضربه، مکانیزم‌های شکست الیاف و جدایش لایه پستی آلومینیوم از هسته کامپوزیتی، مکانیزم‌های جذب انرژی در چند لایه الیاف- فلز می‌باشند. با

برای پیشروی ترک می‌باشد. در نهایت، این پدیده منجر به کاهش شدید مقاومت به ضربه چند لایه الیاف-فلز شده است [۲۵].

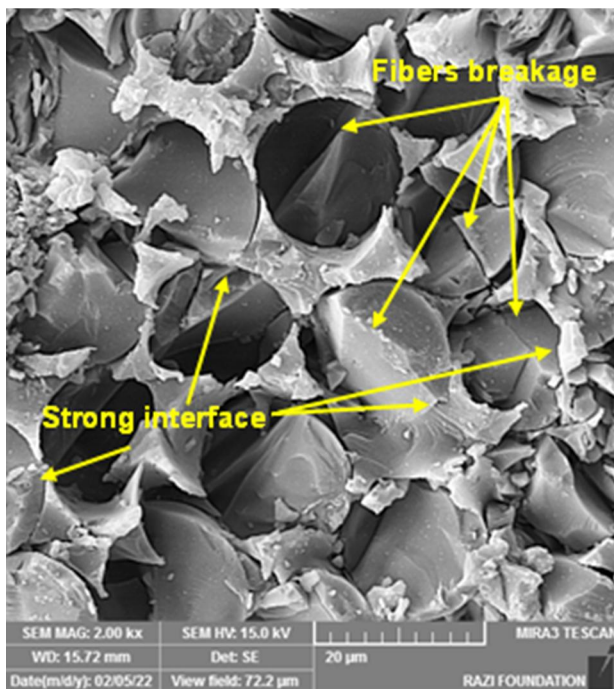


Fig. 10 The microstructural image from glass fibers-epoxy composite as core of FML without thermal cycling

شکل ۱۰ تصویر میکروسکوپی از کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه به عنوان هسته چند لایه الیاف-فلز بدون سیکل حرارتی

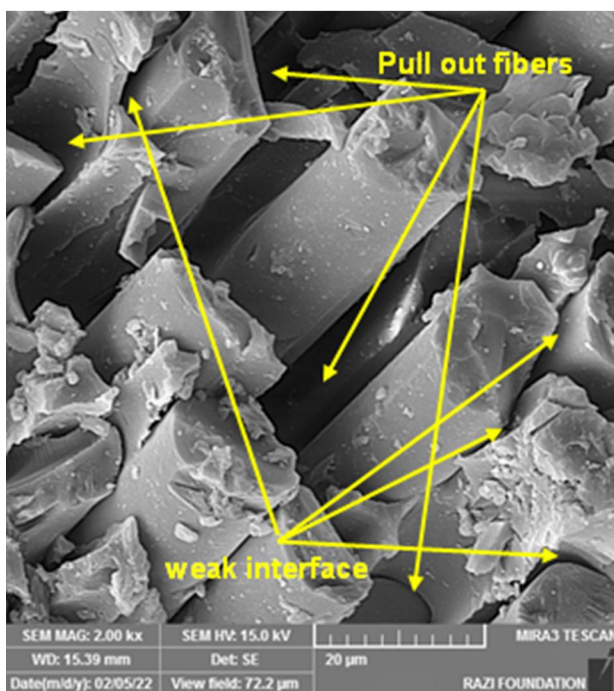


Fig. 11 The microstructural image from glass fibers-epoxy composite as core of FML after 90 thermal cycles

شکل ۱۱ تصویر میکروسکوپی از کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه به عنوان هسته چند لایه الیاف-فلز پس از ۹۰ سیکل حرارتی

شده‌اند. در نهایت در نمونه با ۹۰ سیکل حرارتی می‌توان مشاهده کرد که جدایش بین لایه‌های کامپوزیتی، مکانیزم غالب شکست می‌باشد. این بدین معنی است که میزان تجزیه حرارتی در زمینه بیش‌تر شده، به طوری که زمینه اپوکسی در هسته کامپوزیتی دچار تخریب شده و لایه‌های الیاف شیشه دیگر چسبندگی مناسبی با زمینه ندارند. این نشان می‌دهد که میزان انتقال بار از زمینه به الیاف کاهش یافته که در نهایت موجب کاهش قابلیت جذب انرژی شده است.

با توجه به بررسی‌های انجام شده، در حین اعمال سیکل‌های حرارتی امکان اکسید شدن رزین اپوکسی نیز وجود دارد. تشکیل لایه‌های اکسیدی باعث کاهش میزان تخریب در اپوکسی می‌شود. به همین دلیل می‌توان بیان کرد که در فصل مشترک آلومینیوم/کامپوزیت به دلیل انتقال حرارت یکسان ناشی از رسانا بودن آلومینیوم امکان تشکیل یک لایه اکسیدی وجود دارد. بنابراین می‌توان بیان کرد که اتصال در فصل مشترک آلومینیوم/کامپوزیت دچار تجزیه حرارتی کمتری شده است. اما نفوذ حرارت در لایه‌های داخلی باعث تجزیه حرارتی در فصل مشترک الیاف/زمینه شده است. به عبارت دیگر میزان تجزیه حرارتی در هسته کامپوزیتی بیش‌تر از فصل مشترک پوسته/هسته بوده است [۲۴].

۳-۳- بررسی میکروساختاری

به منظور بررسی دقیق‌تر و شناسایی مکانیزم‌های تأثیرگذار بر رفتار ضربه چند لایه الیاف-فلز تحت سیکل‌های گرمایشی، آنالیز میکروسکوپی امری ضروری است. شکل‌های ۱۰ و ۱۱ به ترتیب سطح مقطع شکست هسته کامپوزیتی نمونه بدون سیکل و نمونه با ۹۰ سیکل حرارتی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۰ می‌توان فهمید که شکستن الیاف شیشه مکانیزم غالب می‌باشد. همچنین چسبندگی بین زمینه اپوکسی و الیاف شیشه مناسب است. به طوری که پدیده بیرون کشیدگی الیاف در نمونه مکانیزم غالب نمی‌باشد. با توجه به شکل ۱۱ در نمونه تحت ۹۰ سیکل حرارتی می‌توان مشاهده کرد که الیاف چسبندگی مناسبی با زمینه اپوکسی ندارند. به طوری که در این کامپوزیت می‌توان پیشروی ترک از بین فصل مشترک الیاف و زمینه را مشاهده کرد. همچنین پدیده بیرون کشیدگی الیاف نیز در این شکل دیده می‌شود. این پدیده‌های شکست پس از ۹۰ سیکل حرارتی نشان‌دهنده این است که به دلیل متفاوت بودن ضریب انبساط حرارتی و تغییر طول‌های چند باره، اتصال زمینه و الیاف در فصل مشترک ضعیف شده است که محلی مناسب

- [4] M. Shamohammadi Maryan, H. Ebrahimnezhad-Khaljiri, R. Eslami-Farsani, The experimental assessment of the various surface modifications on the tensile and fatigue behaviors of laminated aluminum/aramid fibers-epoxy composites, *International Journal of Fatigue*, Vol. 154, 106560, 2022.
- [5] R. Eslami-Farsani, H. Aghamohammadi, S. M. R. Khalili, H. Ebrahimnezhad-Khaljiri, H. Jalali, Recent trend in developing advanced fiber metal laminates reinforced with nanoparticles: A review study, *Journal of Industrial Textiles*, Accessed on 26 August 2020. doi:10.1177/1528083720947106.
- [6] A. Vlot, M. Krull, Impact damage resistance of various fibre metal laminates. *Journal de Physique IV Proceedings, EDP Sciences*, Vol. 07, pp. 1045-4050, 1997.
- [7] J. I. Múgica, L. Aretxabaleta, I. Ulacia, J. Aurrekoetxea, Impact characterization of thermoformable fibre metal laminates of 2024-T3 aluminium and AZ31B-H24 magnesium based on self-reinforced polypropylene, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 61, pp. 67-75, 2014.
- [8] J. Fan, Z. W. Guan, W. J. Cantwell, Numerical modelling of perforation failure in fibre metal laminates subjected to low velocity impact loading, *Composite Structures*, Vol. 93, No. 9, pp. 2430-2436, 2011.
- [9] T. Pärnänen, R. Alderliesten, C. Rans, T. Brander, O. Saarela, Applicability of AZ31B-H24 magnesium in Fibre Metal Laminates – An experimental impact research, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 43, No. 9, pp. 1578-1586, 2012.
- [10] M.H. Pol, G. Liaghat, E. Zamani, A. Ordys, Investigation of the ballistic impact behavior of 2D woven glass/epoxy/nanoclay nanocomposites, *Journal of Composite Materials*, Vol. 49, No. 12, pp. 1449-1460, 2015.
- [11] S. D. Malingam, F. A. Jumaat, L. F. Ng, K. Subramaniam, A. F. A. Ghani, Tensile and impact properties of cost-effective hybrid fiber metal laminate sandwich structures, *Advances in Polymer Technology*, Vol. 37, No. 7, pp. 2385-2393, 2018.
- [12] L. M. G. Vieira, J. C. dos Santos, T. H. Panzera, J. C. C. Rubio, F. Scarpa, Novel fibre metal laminate sandwich composite structure with sisal woven core, *Industrial Crops and Products*, Vol. 99, pp.189-195, 2017.
- [13] M. Najafi, R. Ansari, Influence of thermal aging on mechanical properties of fiber metal laminates hybridized with nanoclay, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 233, No. 19-20, pp. 7003-7018, 2019.
- [14] M. A. Azghan, R. Eslami-farsani, 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. 5, 025302, 2018.

۴- نتیجه‌گیری

در این کار تحقیقاتی، تأثیر سیکل‌های متفاوت حرارتی (۰، ۱، ۱۰، ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۹۰ سیکل) بر چند لایه الیاف-فلز اپوکسی-الیاف شیشه/آلومینیوم با چیدمان‌های متفاوت الیاف (۰°/۰°/۰°/۰°، ۹۰°/۹۰°/۹۰°/۹۰°، ۴۵°/+۴۵°/-۴۵°/+۴۵° و ۰°/۹۰°/۹۰°/۰°) بررسی شد. نتایج بدست آمده به صورت زیر می‌باشد:

- نمونه با چیدمان ۰°/۰°/۰°/۰° با انرژی جذب ۴۵۰kJ/m² بیش‌ترین قابلیت جذب را در مقایسه با دیگر چیدمان‌ها داشت. قابلیت جذب این نمونه پس از ۱۰ سیکل حرارتی به ۵۱۰kJ/m² رسید و پس از آن تا ۹۰ سیکل حرارتی قابلیت جذب انرژی آن کاهش یافت و به ۴۴۸kJ/m² رسید.

- کم‌ترین و بیش‌ترین تأثیر سیکل‌های حرارتی به ترتیب در نمونه‌ها با چیدمان‌های ۴۵°/+۴۵°/-۴۵°/+۴۵° و ۰°/۹۰°/۹۰°/۰° مشاهده شد.

- بررسی ماکروساختاری نشان داد که پس از اعمال سیکل‌های حرارتی، مکانیزم غالب جذب انرژی جدایش بین لایه‌های الیاف شیشه بود. در حالی که در نمونه بدون سیکل حرارتی، پس از آزمون ضربه، مکانیزم‌های شکست الیاف و جدایش لایه پشتی آلومینیوم از هسته کامپوزیتی، مکانیزم‌های جذب انرژی در چند لایه الیاف-فلز بودند.

- بررسی میکروسکوپی در نمونه تحت ۹۰ سیکل حرارتی نشان داد که الیاف شیشه چسبندگی مناسبی با زمینه اپوکسی نداشتند و پیشروی ترک از بین فصل مشترک الیاف-زمینه بود. همچنین پدیده بیرون‌کشیدگی الیاف شیشه از زمینه پس از ۹۰ سیکل حرارتی دیده شد.

۵- مراجع

- [1] H. Ebrahimnezhad Khaljiri, R. Eslami Farsani, H. Khorsand, K. Abbas Banaie, Hybridization effect of fibers reinforcement on tensile properties of epoxy composites, *Journal of Science and Technology of Composite*, Vol. 1, No. 2, pp. 21-28, 2015. (in Persian).
- [2] F. Bahari-Sambran, R. Eslami-Farsani, H. Ebrahimnezhad-Khaljiri, Experimental investigation of flexural behavior of basalt fibers/epoxy-aluminum laminate composites containing nanoclay particles, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 5, No. 1, pp. 45-54, 2018. (in Persian).
- [3] M.Y. Khalid, Z.U. Arif, A. Al Rashid, M.I. Shahid, W. Ahmed, A.F. Tariq, Z. Abbas, Interlaminar shear strength (ILSS) characterization of fiber metal laminates (FMLs) manufactured through VARTM process, *Forces in Mechanics*, Vol. 4, 100038, 2021.

- environmental ageing effect on mechanical and thermal behaviours of E-glass fibre / epoxy composites, *Journal of Polymer Research*, Vol. 25, 214, 2018.
- [21] B. C. Ray, Temperature effect during humid ageing on interfaces of glass and carbon fibers reinforced epoxy composites, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 298, No. 1, pp. 111-117, 2006.
- [22] H. Ebrahimnezhad-Khaljiri, *Hygrothermal aging and their influence on mechanical properties of the bio-composites*, C. Muthukumar, S. Krishnasamy, S. M. K. Thiagamani, S. Siengchin, (Eds), *Aging Effects on Natural Fiber-Reinforced Polymer Composites: Durability and Life Prediction*. pp. 115-136, Singapore: Springer, 2022.
- [23] B. Müller, M. Hagenbeek, J. Sinke, Thermal cycling of (heated) fibre metal laminates, *Composite Structures*, Vol. 152, pp. 106-116, 2016.
- [24] M. Zhang, B. Sun, B. Gu, Accelerated thermal ageing of epoxy resin and 3-D carbon fiber/epoxy braided composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 85, pp. 163-171, 2016.
- [25] B. C. Ray, Adhesion of Glass / Epoxy Composites Influenced by Thermal and Cryogenic Environments, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 102, No. 2, pp. 1943-1949, 2006.
- [15] A. da Costa, D. F. N. R. da Silva, D. N. Travessa, E. C. Botelho, The effect of thermal cycles on the mechanical properties of fiber-metal laminates, *Materials and Design*, Vol. 42, pp. 434-440, 2012.
- [16] H. Ebrahimnezhad-Khaljiri, R. Eslami-Farsani, S. Talebi, Investigating the high velocity impact behavior of the laminated composites of aluminum/jute fibers- epoxy containing nanoclay particles, *Fibers and Polymers*, Vol. 21, No. 11, pp. 2607-2613, 2020.
- [17] H. Rahmani, R. Eslami-Farsani, H. Ebrahimnezhad-Khaljiri, High velocity impact response of aluminum- carbon fibers-epoxy laminated composites toughened by nano silica and zirconia, *Fibers and Polymers*, Vol. 21, No. 1, pp. 170-178, 2020.
- [18] M. Najafi, R. Eslami-Farsani, A. Saeedi, H. Ebrahimnezhad-Khaljiri, *The effect of environmental conditions on the synthetic fiber-reinforced epoxy composites*, S. M. Rangappa, J. Parameswaranpillai, S. Siengchin, S. Thomas (Eds), *Handbook of Epoxy/Fiber Composites*, pp. 16.1-16.51, Singapore: Springer, 2022.
- [19] G. C. Papanicolaou, A. G. Xepapadaki, G. D. Tagaris, Effect of thermal shock cycling on the creep behavior of glass-epoxy composites, *Composite Structures*, Vol. 88, No. 3, pp. 436-442, 2009.
- [20] T. Akderya, Investigation of thermal-oil