



مطالعه تجربی و مقایسه رفتار مکانیکی گلار 2/1 و گلار 3/2 تحت بار خمشی

علی شیرافکن

دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

غلامحسین مجذوبی

استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

محمد کشفی

استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آیت الله بروجردی، بروجرد

چکیده

ورقه‌های فلزی-الیافی (FML)^۱ که از لایه‌های فلزی نازک و لایه اپوکسی تقویت‌شده با الیاف تشکیل شده‌اند، به عنوان جایگزینی مناسب برای آلیاژهای فلزی سنتی محسوب شده و به دلیل خواص مکانیکی مطلوب، در کاربردهایی چون کلاه ایمنی موتورسواران، راه آهن قطارهای پرسرعت، وسایل حفاظت شخصی می‌تواند توسعه یابد. این مطالعه به بررسی تأثیر دما بر روی رفتار مکانیکی آلومینیوم T3-2024، گلار 2/1 و گلار 3/2 تحت بارگذاری خمشی می‌پردازد. نمونه‌ها با نرخ بارگذاری 0/03 بر ثانیه و در دماهای 25، 60 و 100 درجه سلسیوس تحت آزمایش خمش قرار گرفتند. تغییر شکل لایه‌ها با استفاده از فن‌آوری پردازش تصویر رصد شدند. نتایج نشان داد که افزایش لایه‌های میانی موجب افزایش تحمل نیروی خمشی می‌شود. در نرخ کرنش 0/03 و در دماهای 25، 60 و 100 درجه سلسیوس نیروی بیشینه خمشی نمونه‌های گلار 3/2 به ترتیب 1/4، 1/6 و 1/3 برابر نمونه‌های گلار 2/1 و به ترتیب 14/6، 12/2 و 11 برابر نمونه‌های آلومینیوم می‌باشد. با استفاده از نتایج به‌دست‌آمده در دماهای مختلف، می‌توان تغییر شکل آلومینیوم T3-2024، گلار 2/1 و گلار 3/2 را در فرآیندهای شکل‌دهی پیش‌بینی نمود.

واژگان کلیدی: تورق، خمش 3 نقطه‌ای، دما، نرخ کرنش، خواص مکانیکی



مقدمه

ورقه‌های فلزی-الیافی (FML)، به عنوان جایگزینی مناسب برای آلیاژهای فلزی سنتی محسوب می‌شوند، همچنین زمینه های تحقیقاتی کاربردهای ورقه‌های فلزی-الیافی در کلاه ایمنی موتورسواران، راه آهن قطارهای پرسرعت، وسایل حفاظت شخصی و کشتی های پرسرعت همچنان باز می‌باشد. برخی از رویکردهای امکان پذیر بهبود رفتار ضربه ای FML ها، استفاده از مواد پیشرفته (شامل مواد افزودنی نانو)، ساختارهای جدید و فناوری های جدید تولیدی می‌باشد. پیش‌بینی می‌شود که FML ها نقش مهم‌تری در ایجاد تعادل در عملکرد بالا و هزینه کم برای توسعه سازه‌های سبک وزن داشته باشند (Taherzadeh-Fard et al, 2020).

تجاری‌ترین ورقه‌های فلزی-الیافی موجود عبارت‌اند از ورقه آلومینیوم تقویت‌شده با الیاف آرامید (آرال)^۲، ورقه آلومینیوم تقویت شده با الیاف شیشه (گلار)^۳ و ورقه آلومینیوم تقویت‌شده با الیاف کربن (کارال)^۴. پیوند بین الیاف شیشه و چسبندگی گلار بسیار مطلوب‌تر از آرال است. به دلیل خواص عالی از گلار در قسمت‌های مختلفی از هواپیماهای ایرباس 380 و بوئینگ 757 استفاده می‌شود (He et al, 2021).

در مطالعه ویسنوم و اتکینسون (Wisnom and Atkinson, 1997) بر روی گلار مشخص شد که در آزمایش خمش سه-نقطه‌ای حداکثر تنش با افزایش ضخامت ورق آلومینیوم کاهش و همچنین افزایش ابعاد نمونه، موجب کاهش کرنش می‌شود. ری (Ray, 2005) به بررسی شوک حرارتی و خستگی حرارتی را در تورق کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه در آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای پرداخت. نتایج نشان داد که میزان اثر تخریبی خستگی حرارتی در جهت‌گیری الیاف در کامپوزیت‌ها، متفاوت است. تأثیر چینش لایه‌ها و نرخ کرنش بر رفتار خمشی چهار نوع از ورقه‌های فلزی-الیافی در مطالعه راجکومار و همکاران (Rajkumar et al, 2014) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد استحکام خمشی با افزایش نرخ کرنش کاهش می‌یابد. در مطالعه لیو و همکاران ILSS (Liu et al, 2016)^۵ بر روی ورق‌های شیشه ای اپوکسی تقویت شده با آلومینیوم در آزمایش خمش سه نقطه‌ای مشخص شد که چینش شیشه/اپوکسی بر نتیجه نیرو-جابجایی و حالت شکست تأثیر می‌گذارد. نتایج مطالعه لین و همکاران (Lin et al, 2022) بر روی مقاومت خمشی و شکل‌پذیری ورقه فلزی-الیافی با هسته سه‌بعدی در آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای و شبیه‌سازی عددی مدل المان محدود نشان داد، وجود ورقه فلزی-الیافی به‌عنوان صفحه رویی استحکام خمشی، سفتی و شکل‌پذیری را به میزان قابل‌توجهی بهبود می‌بخشد. در مطالعه بر روی نمونه‌های گلار توسط هینز و همکاران (Hinz et al, 2005) مشخص شد که با افزایش دما، استحکام برشی لایه‌های درونی و استحکام خمشی کاهش یافته و همچنین در دمای پایین تورق بین لایه‌های الیاف پدیده غالب است. چان مینگ جی و همکاران (Ji et al, 2021) در مطالعه‌ای روابط بین مقاومت خمشی تیتانیوم/الیاف کربن- پلی‌اترکتون، برای سه چینش مختلف لایه‌ای در دماهای متفاوت را بررسی نمودند. نتیجه مطالعه این بود که برای لمینت با ساختاری مشابه، هر چه دمای آزمایش بالاتر رود، مقاومت خمشی کمتر می‌شود. کاریلو و کانتول (Carrillo and Cantwell, 2009) بر روی یک نوع FML سبک وزن شامل لایه‌های نازک آلیاژ آلومینیوم و یک کامپوزیت پلی پروپیلن تقویت شده با الیاف پلی پروپیلن تحقیقاتی انجام دادند. نامبردگان شرایط کششی، خمشی و ضربه با سرعت کم را بر روی این نمونه‌ها بررسی و مقایسه کردند. مجموعه‌ای از آزمایش‌های کششی نشان داده‌اند که FML ها استحکام بالاتری نسبت به کامپوزیت ترموپلاستیک ساده دارند.

2. Aramid reinforced Aluminum laminate (ARALL)

3. Glass Reinforced Aluminum Laminate (GLARE)

4. Carbon Reinforced Aluminum Laminate (CARALL)

5. interlaminar shear strength



پانل‌های پوسته هواپیما در زمان طولانی در معرض آفتاب یا در آب و هوای گرم و خشک هستند و دمای 80 درجه سلسیوس و در آب و هوای قطبی و در ارتفاعات بالا تا 60- درجه سلسیوس را تجربه می‌کنند (Rans et al, 2011). حداکثر دمای استفاده مداوم برای ورقه‌های استاندارد گلار معمولاً حدود 200 درجه سلسیوس می‌باشد که با قرار گرفتن در معرض متناوب گرما، می‌تواند تا دمای 300 درجه سلسیوس را تحمل کنند. آلومینیوم می‌تواند دمای بسیار بالاتری را تحمل کند، اما الیاف شیشه و رزین اپوکسی حداکثر دمای قابل تحمل را محدود می‌کند. افزایش ضخامت ورق آلومینیومی به بهبود مقاومت حرارتی کلی کمک می‌کند.

باتوجه به اثر دما و نرخ کرنش بر خواص مکانیکی گلار، مطالعه دو متغیر مذکور در بررسی‌های مکانیکی مورد نیاز است؛ لذا، در این مطالعه به بررسی و مقایسه هم‌زمان اثر دما و نرخ کرنش بر روی نمونه‌های گلار 2/1 و گلار 3/2 پرداخته شد و نتایج تغییر شکل، نیروی و ضریب خمشی نمونه‌ها تحت شرایط بارگذاری خمشی در دماها و نرخ‌های کرنش مختلف ارائه می‌شود. همچنین، پدیده تورق با استفاده از تجهیزات فناوری پردازش تصویر اولین مورد بررسی قرار می‌گیرد.

روش تحقیق

برای ساخت نمونه‌های گلار 2/1، از دولایه بیرونی آلومینیوم T3-2024 و یک‌لایه میانی ماده مرکب شامل شش عدد لایه الیاف شیشه با چگالی سطحی 200 گرم بر مترمربع، رزین و سخت‌کننده به صورت لایه‌چینی دستی استفاده شد. شکل 1 (الف)، نمایی از چینش لایه‌های مورد استفاده در گلار 2/1 را نشان می‌دهد.

نمونه‌های گلار 3/2 شامل دولایه بیرونی و یک لایه در وسط از جنس آلومینیوم T3-2024 بوده که بین این لایه‌های فلزی ماده مرکب شامل شش عدد لایه الیاف شیشه، رزین و سخت‌کننده به صورت لایه‌چینی دستی استفاده شده است. در شکل 2 (الف) چینش لایه‌های نمونه گلار 3/2 نمایش داده شده است.

لایه‌های الیاف در جهت نورده لایه‌های آلومینیومی و در جهت طول نمونه قرار گرفتند. فضای مشترک بین لایه‌های الیاف شیشه باهم و سطح مشترک بین ورق آلومینیوم و الیاف شیشه به کمک رزین اپوکسی آرالدیت^۶ و سخت‌کننده آرادور^۷، به دلیل خواص مکانیکی مناسب و استفاده در صنایع هوایی، آغشته شد. بنابر پیشنهاد سازنده رزین اپوکسی، نمونه‌ها به مدت دو ساعت تحت فشار 6 بار و دمای 80 درجه سلسیوس در دستگاه پرس تخت داغ قرار گرفتند. سپس، نمونه‌ها به مدت دو ساعت دیگر تحت فشار باقی‌مانده تا به صورت طبیعی به دمای اتاق برسند.

در انجام آزمایش‌ها از نمونه‌های تخت مستطیلی بر اساس استاندارد ASTM D3039 (Kashfi et al, 2011) مطابق شکل 1 (ب) استفاده شد. به کاررفته در نمونه تولید شده از نسبت مجموع ضخامت لایه‌های آلومینیوم تقسیم بر ضخامت کلی گلار به دست می‌آید. با توجه به ضخامت دولایه آلومینیوم (2×0/5 میلی‌متر) و ضخامت کلی نمونه (9/1 میلی‌متر)، درصد حجمی فلز در ساخت نمونه‌های گلار 2/1 برابر با 53٪ می‌باشد، به همین ترتیب درصد حجمی فلز نمونه‌های گلار 3/2 برابر با 51٪ می‌باشد. بر اساس نتایج تحقیقات قبل (Wollmann et al) برای آزمون خمش، نسبت دهانه (فاصله تکیه‌گاهی) به ضخامت (L/H) 16 تعیین شد (شکل 1 و 2 (ب)).

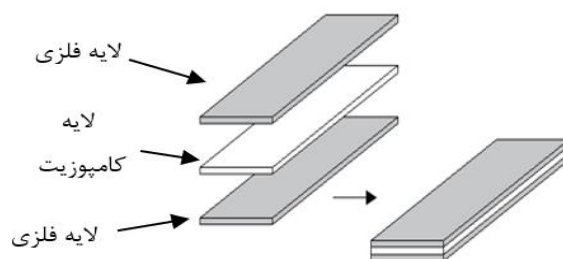
به منظور انجام آزمایش‌ها از دستگاه کشش ساخت شرکت سنتام با ظرفیت 15 تن، لوازم داده‌برداری و تجهیزات فناوری پردازش تصویر شامل یک دوربین و یک منبع نوری مطابق شکل 3 استفاده شد. همچنین، به منظور انجام آزمایش در دماهای بالاتر از دمای اتاق از یک دمنده گرم صنعتی به همراه یک دماسنج غیر تماسی لیزری نیز استفاده گردید. قطر غلتک‌های استفاده شده در آزمایش خمش سه نقطه‌ای برابر با 10 میلی‌متر در نظر گرفته شد. برای انجام آزمایش‌ها، تصویربرداری با

6. Araldite LY5052

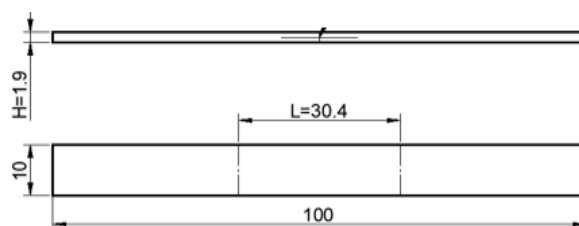
7. Aradur5052



سرعت 50 فریم بر ثانیه انجام شد. در جدول‌های 1، 2 و 3 نمونه‌های آلومینیوم و گالر 2/1 و 3/2 بر حسب دما و سرعت بارگذاری کدگذاری شده‌اند. نرخ کرنش اعمال شده برابر 0/03 (0/0833 میلی‌متر بر ثانیه) می‌باشد.

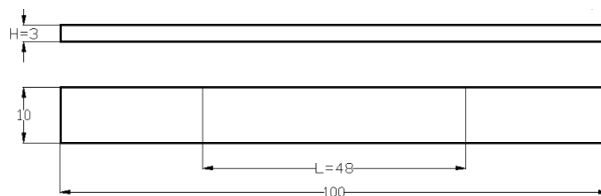
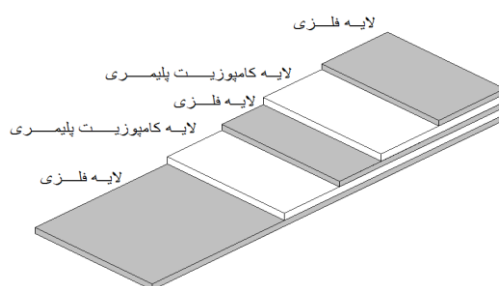


(الف)



(ب)

شکل 1 (الف) نحوه چیدمان گالر 2/1، (ب) ابعاد نمونه



شکل 2- (الف) نحوه چیدمان نمونه گالر 3/2 و (ب) ابعاد نمونه

گالر 3/2



جدول 1 کدگذاری نمونه‌های آلومینیوم در در دماهای مختلف و سرعت 0/0833 میلیمتر بر ثانیه

سرعت (میلی متر بر ثانیه)	دما (درجه سلسیوس)		
	25	60	100
0/0833	Al25L	Al60L	Al100L

جدول 2 کدگذاری نمونه‌های گلار 2/1 در در دماهای مختلف و سرعت 0/0833 میلیمتر بر ثانیه

سرعت (میلی متر بر ثانیه)	دما (درجه سلسیوس)		
	25	60	100
0/0833	G25L	G60L	G100L

جدول 3 کدگذاری نمونه‌های گلار 3/2 در دماهای مختلف و سرعت 0/0833 میلیمتر بر ثانیه

سرعت (میلیمتر بر ثانیه)	دما (درجه سلسیوس)		
	25	60	100
0/0833	GT25L	GT60L	GT100L



شکل 3 تجهیزات مورد استفاده در انجام آزمایش خمش سه نقطه‌ای

یافته ها

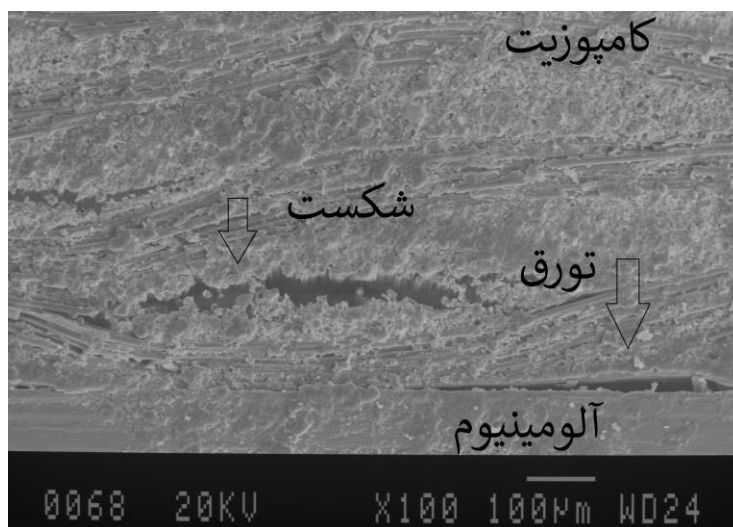
وجود ترک‌های فاز زمینه و تنش برشی بین لایه‌ای در امتداد سطح مشترک، سختی متفاوت بین لایه‌های مجاور و تغییر شکل لایه‌ها موجب بروز پدیده تورق می‌شود (González et al, 2011).

زمانی که آلومینیوم شروع به تغییر شکل پلاستیک می‌کند، الیاف به علت استحکام برشی بالای لایه‌های حاوی رزین در حالت الاستیک باقی می‌مانند. جدایش بین الیاف و زمینه سبب ایجاد ترک همراه با تورق می‌شود، به طوری که در نهایت با افزایش تنش‌های برشی در این لایه‌ها، تورق شکل می‌گیرد. در تمام نمونه‌ها، تورق بین لایه بالا و لایه کامپوزیت مشاهده می‌شود که می‌تواند نشان‌دهنده تنش برشی بین لایه‌ای بیشتر لایه بالایی و در نتیجه تورق زودتر آن باشد.

در شکل 4 تصاویر SEM^۸ مربوط به یک نمونه گلار 2/1 در دمای 100 درجه سلسیوس و نرخ کرنش 0/03، نشان داده شده-



است، که در آن تورق بین لایه آلومینیوم و کامپوزیت و شکست لایه کامپوزیت مشاهده می شود.

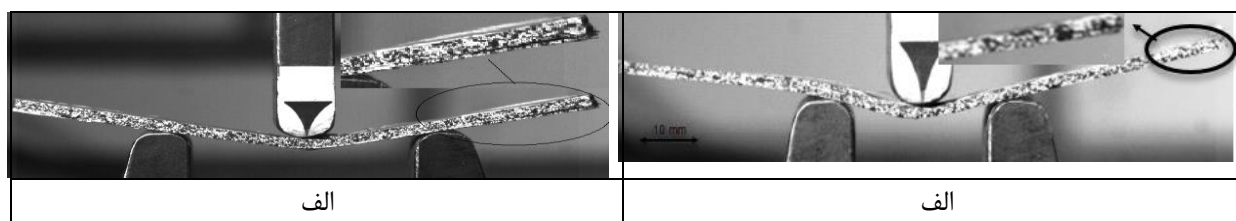


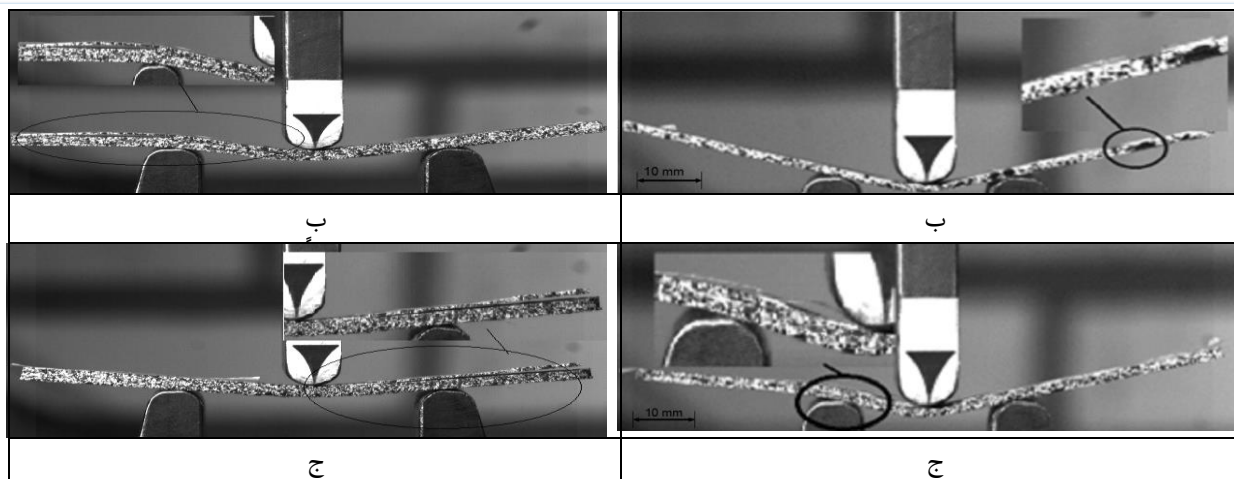
شکل 4 تصویر SEM تورق و شکست الیاف نمونه های گلار 2/1 در دمای 100 درجه سلسیوس و نرخ کرنش 0/03

با افزایش دما، خواص مکانیکی لایه پلیمری کاهش یافته، در نتیجه مقاومت در برابر تغییر شکل و شکست تحت بار کاهش می یابد. در طول آزمایش خمش با ادامه تغییر شکل، تورق به سمت الیاف تا جایی که ترک در لایه رزین با جدا شدن الیاف شیشه و رزین اپوکسی محدود شود، گسترش می یابد. علاوه بر این، تغییر شکل و تنش بیشتر، شکستن الیاف را سرعت بخشیده، در نتیجه، حداکثر کرنش های الیاف بر حداکثر تنش خمشی آن ها در طول خمش تأثیر می گذارد. به طور کلی، سطح مشترک الیاف ماتریس به دلیل ضعف نسبی، محتمل ترین محل شروع شکست است. انبساط و انقباض حرارتی لایه های مختلف به دلیل تفاوت در ضرایب انبساط حرارتی آلومینیوم و لایه کامپوزیتی سبب تورق و شکست گلار شود.

با افزایش دما در نمونه های گلار، لایه فلزی در گلار دچار انبساط و نرم شدن حرارتی می شود، این انبساط حرارتی لایه فلزی موجب تنش های داخلی در گلار می شود که در نتیجه باعث تغییر شکل آن و در نهایت شکست در بار کمتر می شود، همچنین نرم شدن لایه فلزی توانایی آن را در حمل بار کاهش داده و در نتیجه سفتی و استحکام آن کاهش می یابد.

در شکل 5 تغییر شکل های نمونه مربوط به نقاط بیشینه نمودار نیروی خمشی-جابجایی، با مطابقت زمانی بین اطلاعات خروجی دستگاه کشش و پردازش تصویر دیجیتال، برای شرایط دمایی مختلف و نرخ کرنش 0/03 بر ثانیه نشان داده شده است. در لحظه تورق، نمودار نیرو-جابجایی پس از رسیدن به نقطه حداکثر نیرو، دچار افت ناگهانی می شود. اولین تورق با افزایش دما از انتهای نمونه به سمت تکیه گاه در حال جابه جا شدن است.





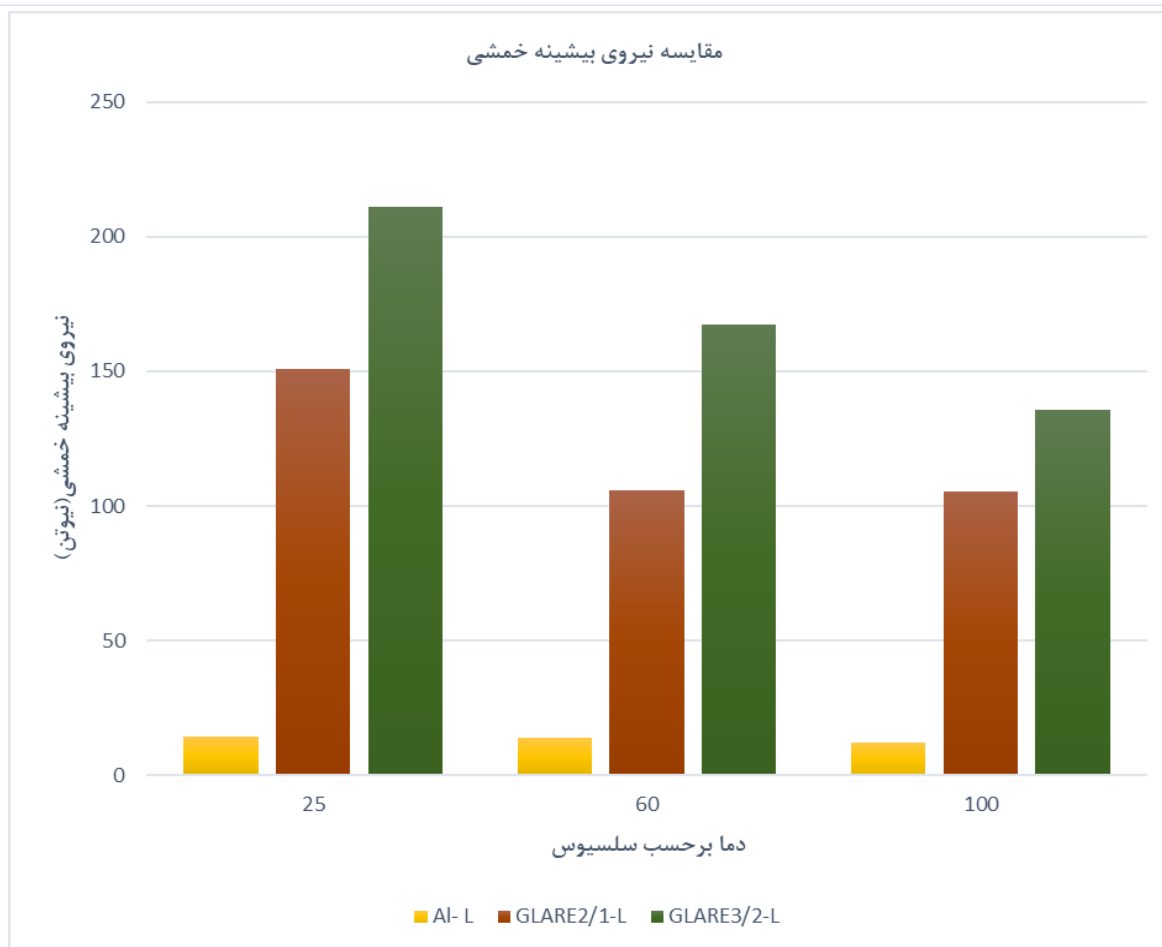
شکل 5 سمت راست تصویر نمونه های (الف) G25L، (ب) G60L و (ج) G100L تحت بارگذاری خمشی سه نقطه ای در لحظه بروز اولین تورق، سمت چپ تصویر نمونه های (الف) GT25L، (ب) GT60L و (ج) GT100L تحت بارگذاری خمشی سه نقطه ای در لحظه بروز اولین تورق

افزایش لایه های میانی موجب افزایش تحمل نیروی خمشی می شود. افزایش حداکثر نیروی خمشی نمونه های گلار در مقایسه با نمونه های آلومینیومی در یک آزمایش خمشی 3 نقطه ای را می توان به ماهیت ترکیبی گلار نسبت داد. از آنجاییکه گلار از لایه های آلومینیومی تشکیل شده که با لایه های پلیمری تقویت شده با الیاف به هم متصل شده اند، این ساختار کامپوزیتی در مقایسه با آلومینیوم خالص، سفتی، استحکام و قابلیت های جذب انرژی را در گلار افزایش می دهد. وجود تقویت کننده الیاف در گلار به بهبود ظرفیت باربری و مقاومت در برابر خمش کمک کرده و در نتیجه در مقایسه با نمونه های آلومینیومی، حداکثر نیروی خمشی در آزمایش خمشی 3 نقطه ای بالاتر است.

در شکل 6 نمودار میله ای نیروی خمشی بیشینه نمونه های آلومینیوم، گلار 2/1 و گلار 3/2 در دماهای 25، 60 و 100 درجه سلسیوس برای نرخ کرنش 0/03 نشان داده شده است. نتایج مقایسه نیروی خمشی بیشینه نمونه های گلار 2/1، گلار 3/2 و آلومینیوم 2024-T3 با ضخامت 0/5 میلیمتر در ادامه بیان شده است. نیروی بیشینه خمشی نمونه های گلار 2/1 نسبت به نمونه های آلومینیوم 2024-T3 با ضخامت 0/5 میلیمتر در تمام دماها بیشتر است، بطوریکه در نرخ کرنش $\dot{\epsilon}=0.03$ ، نیروی بیشینه خمشی نمونه های گلار 2/1 در دماهای 25، 60 و 100 درجه سلسیوس به ترتیب، 10/4، 7/7 و 8/5 برابر نمونه آلومینیومی می باشد.

در مقایسه نیروی بیشینه خمشی نمونه های گلار 2/1 و گلار 3/2 در نرخ کرنش $\dot{\epsilon}=0.03$ مشاهده می شود، افزایش تعداد لایه ها موجب افزایش نیروی بیشینه خمشی می شود، بطوریکه در دماهای 25، 60 و 100 درجه سلسیوس نیروی بیشینه خمشی نمونه های گلار 3/2 به ترتیب، 1/4، 1/6 و 1/3 برابر نمونه های گلار 2/1 می باشد.

با بررسی نمودار و مقایسه نیروی بیشینه خمشی نمونه های گلار 3/2 و آلومینیوم در نرخ کرنش $\dot{\epsilon}=0.03$ می توان نتیجه گرفت که در دماهای 25، 60 و 100 درجه سلسیوس نیروی بیشینه خمشی نمونه های گلار به ترتیب 14/6، 12/2 و 11 برابر نمونه های آلومینیوم می باشد.



شکل 6 مقایسه نیروی بیشینه خمشی نمونه‌های آلومینیوم، گلار 2/1 و گلار 3/2 در دماهای 25، 60 و 100 درجه سانتیگراد و نرخ کرنش 0/03

بحث و نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، نمونه‌های آلومینیوم 2024-T3، گلار 2/1 و گلار 3/2 جهت آزمایش خمش سه نقطه‌ای آماده‌سازی شدند. نمونه‌ها در دماهای 25، 60 و 100 درجه سلسیوس در نرخ کرنش 0/03 بر ثانیه تحت آزمایش خمش قرار گرفتند تا تأثیر دما کرنش بر استحکام خمشی نمونه‌ها بررسی شود. تصاویر حاصل از فن‌آوری پردازش تصویر دیجیتال مربوط به نقاط اکسترمم تغییر شکل‌های رخ داده در این نقاط مورد بازبینی قرار گرفت. نتایج حاصل از مشاهدات عبارت‌اند از:



1. در تمام نمونه‌ها، تورق بین لایه بالا و لایه کامپوزیت مشاهده می‌شود که می‌تواند نشان‌دهنده تنش برشی بین لایه‌ای بیشتر لایه بالایی و در نتیجه تورق زودتر آن باشد.
 2. با افزایش دما، خواص مکانیکی لایه پلیمری کاهش یافته، در نتیجه مقاومت در برابر تغییر شکل و شکست تحت بار کاهش می‌یابد.
 3. افزایش لایه‌های میانی موجب افزایش تحمل نیروی خمشی می‌شود. وجود تقویت کننده الیاف در گلار به بهبود ظرفیت باربری و مقاومت در برابر خمش کمک کرده و در نتیجه در مقایسه با نمونه‌های آلومینیومی، حداکثر نیروی خمشی در آزمایش خمش 3 نقطه‌ای بالاتر است.
 4. در نرخ کرنش $\dot{\epsilon} = 0.03$ ، نیروی بیشینه خمشی نمونه‌های گلار 2/1 در دماهای 25، 60 و 100 درجه سلسیوس به ترتیب، 10/4، 7/7 و 8/5 برابر نمونه آلومینیومی می‌باشد.
 5. در نرخ کرنش $\dot{\epsilon} = 0.03$ و در دماهای 25، 60 و 100 درجه سلسیوس، نیروی بیشینه خمشی نمونه‌های گلار 3/2 به ترتیب 14/6، 12/2 و 11 برابر نمونه‌های آلومینیوم می‌باشد.
 6. در نرخ کرنش $\dot{\epsilon} = 0.03$ مشاهده می‌شود، افزایش تعداد لایه‌ها موجب افزایش نیروی بیشینه خمشی می‌شود، بطوریکه در دماهای 25، 60 و 100 درجه سلسیوس نیروی بیشینه خمشی نمونه‌های گلار 3/2 به ترتیب، 1/4، 1/6 و 1/3 برابر نمونه‌های گلار 2/1 می‌باشد.
- پیشنهاد می‌شود چینش‌های مختلف لایه‌های گلار در زوایای 45.0 و 90 درجه در نرخ‌های کرنش متفاوت و همچنین دماهای گوناگون مورد مطالعه قرار گیرد. همچنین مقایسه خواص مکانیکی در آزمون خمش 3 نقطه‌ای نمونه‌های گلار و کولار در نرخ‌های کرنش و دماهای گوناگون انجام پذیرد. در مطالعه حاضر، آماده‌سازی ورقه‌های آلومینیوم با سنباده و در دو جهت عمودبرهم انجام گرفت. پیشنهاد می‌شود جهت بررسی تاثیر روش آماده سازی سطح بر نتایج، سایر روش‌های آماده‌سازی سطحی چون آنودایز هم بررسی و نتایج حاصل از این روش‌ها مقایسه گردد.



منابع

- Taherzadeh-Fard, A., Liaghat, G., Ahmadi, H., Razmkhah, O., Charandabi, S. C., Zarezadeh-mehrizi, M. A., & Khodadadi, A. (2020). Experimental and numerical investigation of the impact response of elastomer layered fiber metal laminates (EFMLs). *Composite Structures*, 245, 112264.
- He, W., Wang, L., Liu, H., Wang, C., Yao, L., Li, Q., & Sun, G. (2021). On impact behavior of fiber metal laminate (FML) structures: A state-of-the-art review. *Thin-Walled Structures*, 167, 108026.
- Wisnom, M. R., & Atkinson, J. W. (1997). Reduction in tensile and flexural strength of unidirectional glass fibre-epoxy with increasing specimen size. *Composite Structures*, 38(1-4), 405-411.
- Ray, B. C. (2005). Thermal shock and thermal fatigue on delamination of glass-fiber-reinforced polymeric composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 24(1), 111-116.
- Rajkumar, G. R., Krishna, M., Narasimhamurthy, H. N., Keshavamurthy, Y. C., & Nataraj, J. R. (2014). Investigation of tensile and bending behavior of aluminum based hybrid fiber metal laminates. *Procedia Materials Science*, 5, 60-68.
- Liu, C., Du, D., Li, H., Hu, Y., Xu, Y., Tian, J., ... & Tao, J. (2016). Interlaminar failure behavior of GLARE laminates under short-beam three-point-bending load. *Composites Part B: Engineering*, 97, 361-367.
- Lin, Y., Li, H., Kuang, N., Chen, S., & Tao, J. (2022). Experimental and numerical research on flexural behavior of fiber metal laminate sandwich composite structures with 3D woven hollow integrated core. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 24(4), 1790-1807.
- Hinz, S., Heidemann, J., & Schulte, K. (2005). Damage evaluation of GLARE® 4B under interlaminar shear loading at different temperature conditions. *Advanced Composites Letters*, 14(2), 096369350501400201.
- Ji, C., Hu, J., Wang, B., Zou, Y., Yang, Y., & Sun, Y. (2021). Mechanical behavior prediction of CF/PEEK-titanium hybrid laminates considering temperature effect by artificial neural network. *Composite Structures*, 262, 113367.
- Carrillo, J. G., & Cantwell, W. J. (2009). Mechanical properties of a novel fiber-metal laminate based on a polypropylene composite. *Mechanics of materials*, 41(7), 828-838.
- Rans, C. D., Alderliesten, R. C., & Benedictus, R. J. E. F. M. (2011). Predicting the influence of temperature on fatigue crack propagation in Fibre Metal Laminates. *Engineering Fracture Mechanics*, 78(10), 2193-2201.
- Kashfi, M., Majzoobi, G. H., Bonora, N., Iannitti, G., Ruggiero, A., & Khademi, E. (2017). A study on fiber metal laminates by using a new damage model for composite layer. *International Journal of Mechanical Sciences*, 131, 75-80.
- Wollmann, T., Hahn, M., Wiedemann, S., Zeiser, A., Jaschinski, J., Modler, N., ... & Paul, C. (2018). Thermoplastic fibre metal laminates: Stiffness properties and forming behaviour by means of deep drawing. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 18(2), 442-450.
- González Juan, E. V., Maimí Vert, P., Camanho, P. M. P. R. D. C., Lopes, C. S., & Blanco Villaverde, N. (2011). Effects of ply clustering in laminated composite plates under low-velocity impact loading. © *Composites Science and Technology*, 2011, vol. 71, núm. 6, p. 805-817.



Experimental study and comparison of the mechanical behavior of GLARE 2/1 and GLARE 3/2 under bending load

Ali Shirafkan⁹

PhD student, Mechanical Engineering, Bu Ali Sina
University, Hamadan

Gholamhossein Majzoobi

Professor, Mechanical Engineering, Bu Ali Sina
University, Hamedan

Mohammad Kashfi

Assistant Professor, Mechanical Engineering, Ayatollah Boroujrdi University, Boroujrd

Abstract

Fiber-metal Laminates (FML), which are composed of thin metal layers and fiber-reinforced epoxy layer, are considered as a suitable alternative to traditional metal alloys, and due to their favorable mechanical properties, they are used in applications such as Motorcycle helmets, high-speed railways, personal protective equipment can be developed. This study investigates the effect of temperature on the mechanical behavior of aluminum 2024-T3, Glare 2/1 and Glare 3/2 under 3points bending loading. The samples were subjected to bending test with a loading rate of 0.03/s and at temperatures of 25, 60 and 100 degrees Celsius. The deformation of the layers was observed using Digital Image Correlation. The results showed that increasing the middle layers increases the tolerance of bending force. At the strain rate of 0.03 and at temperatures of 25, 60 and 100 degrees Celsius, the maximum bending force of the Glare 3/2 samples is 1.4, 1.6 and 1.3 times that of the Glare 2/1 samples respectively and It is 14.2, 12.2 and 11 times that of aluminum samples. Using the results obtained at different temperatures, it is possible to predict the deformation of aluminum 2024-T3, Glare 2/1 and Glare 3/2 in forming processes.

Keywords: delamination, 3-point bending, temperature, strain rate, mechanical properties