Archive of SID

مجله مهندسی ساخت و تولید ایران، خرداد و تیر 1398، دوره 6، شماره 2، ص‌ص. 10-19

دو ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی ساخت و تولید ایران

www.smeir.org

بررسی فصل مشترک و رفتار ضربه شارپی چندلایه‌های الیاف/ فلز حاوی نانوصفحات گرافن و الیاف هیبریدی شیشه/ کولار

سید نوید حسینی آب‌بندانک[1]، مهدی عبدالهی آذغان[1]، رضا اسلامی فارسانی[2*]

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

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

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

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 21 مهر 1397

پذیرش: 15 آذر 1397

ارائه در سایت: خرداد 1398

کلیدواژگان:

کامپوزیت الیاف/ فلز

گرافن

ضربه شارپی

الیاف هیبریدی

چکیده

در این پژوهش، رفتار ضربه کامپوزیت‌های چندلایه‌ای الیاف/ فلز حاوی گرافن، تقویت شده با پارچه هیبرید الیاف شیشه و کولار بررسی شد. به این منظور چندلایه‌های هیبرید الیاف شیشه و کولار/ آلومینیوم 2024 با درصدهای وزنی متفاوت گرافن به روش لایه‌گذاری دستی ساخته شدند و تحت آزمون ضربه شارپی قرار گرفتند. همچنین پیش از ساخت کامپوزیت‌ها سطح ورق‌های آلومینیوم با استفاده از روش شیمیایی اصلاح شده تا پیوند میان آن‌ها و لایه کامپوزیتی محکم‌تر باشد. مطابق با نتایج، استفاده از گرافن سبب کاهش استحکام ضربه در کامپوزیت‌های الیاف/ فلز شد و با افزودن 0/25، 0/5 و 1 درصد وزنی گرافن به اپوکسی، به ترتیب، 34/2، 41/8 و 58/86 درصد کاهش در استحکام ضربه نسبت به نمونه فاقد گرافن بدست آمد. با افزایش مقدار گرافن در کامپوزیت، میزان و احتمال جدایش میان ورق آلومینیومی و لایه کامپوزیتی افزایش یافته و همچنین کامپوزیت الیاف/ فلز از خود رفتار تردتری نشان داد. در نمونه‌های فاقد گرافن، جدایش رخ نداده، اما با افزایش درصد گرافن، جدایش بیشتر شده و در نهایت برای نمونه‌های حاوی 1 درصد وزنی گرافن علی رغم جدایش میان ورق فلزی و لایه کامپوزیتی، شکست ترد در کامپوزیت و متعاقباً شکست ورق آلومینیومی مشاهده شد. مطابق با تصاویر میکروسکوپی حضور گرافن و کلوخه‌های آن در فصل مشترک ورق آلومینیومی و لایه کامپوزیتی موجب جوانه‌زنی و رشد ترک می‌شود. همچنین، نانوصفحات گرافن، حفرات ایجاد شده بر روی سطح آلومینیوم را (که به منظور برهمکنش بهتر با رزین توسط اصلاح سطحی تشکیل شده بودند)، پر کرده و مانع از نفوذ رزین و پیوند مناسب میان رزین اپوکسی و آلومینیوم می‌شوند.

Investigation the interface and charpy impact behavior of fiber metal laminates containing graphene nanoplatelets and glass\ kevlar hybrid fibers

Seyyed Navid Hosseini Abbandanak, Mehdi Abdollahi Azghan, Reza Eslami-Farsani*

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

* 19919-43344, Tehran, Iran, eslami@kntu.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received 13 October 2018

Accepted 6 December 2018

Available Online June 2019

Keywords:

Fiber metal laminate

Graphene

Charpy impact

Hybrid fibers

Abstract

In this research, the effect of graphene on the impact behavior of fiber metal laminates (FMLs) reinforced with hybrid of glass and Kevlar fibers, was investigated. For this purpose, FMLs including hybrid of glass and Kevlar fibers/ aluminum 2024 with different weight percent of graphene were made by hand lay- up method and subjected to impact charpy test. Also, before making composites, the surface of aluminum sheets is modified using a chemical method to improve the bond between it and the composite layer. According to the results, the use of graphene reduced the strength of the impact in the fiber / metal composites. Thus, by adding 0.25, 0.5 and 1% graphene to epoxy, 34.2, 41.8 and 58.86%, respectively, reduction were observed in the impact strength compared to the graphene-free sample. According to the studies, increasing the amount of graphene in the composite, the degree and the probability of separation between the aluminum sheet and the composite layer increased, and the FMLs showed a more brittle behavior. Thus, in the sample without graphene, the separation did not occurred, but with increasing graphene, the separation become more and finally for samples containing 1 wt.% graphene despite the separation between the sheet metal and the layer of composite, brittle fracture in the composite and the subsequent failure of aluminum sheet was observed. According to microscopic images, the presence of graphene and its agglomerate at the interface between the aluminum sheet and the composite layer causes initiation and crack growth. Graphene also fills the cavities formed on the aluminum surface, which are formed to better interact with the resin by surface modification, and prevent the penetration of the resin and the proper bonding between the epoxy resin and the aluminum.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

S. N. Hosseini Abbandanak, M. Abdollahi Azghan, R. Eslami-Farsani, Investigation the interface and charpy impact behavior of fiber metal laminates containing graphene nanoplatelets and glass\ kevlar hybrid fibers, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 6, No. 2, pp. 10-19, 2019 (in Persian)

www.SID.ir

Archive of SID

1- مقدمه

با افزودن الیاف و ذرات نانو و میکرومتری به زمینه پلیمری می‌توان خواص آن را تقویت نمود، اما یکی از مشکلاتی که همچنان در استفاده از کامپوزیت‌های زمینه پلیمری جهت تولید قطعاتی همانند بدنه هواپیما و بالگردها وجود دارد، مقاومت پایین آن‌ها در برابر سایش و ضربه می‌باشد. کامپوزیت‌های پلیمری از خواص خستگی، استحکام و سفتی بالا برخوردارند، در حالی که فلزات مزایای استحکام سایشی و مقاومت به ضربه بالا و سهولت در تعمیر را دارا هستند.

مهندسان در دانشگاه دلفت[1] به منظور ترکیب خواص فلزات و کامپوزیت‌های پلیمری از کامپوزیت‌های لایه‌ای الیاف/ فلز (FML[2]) رونمایی کردند [1]. کامپوزیت‌های FML شامل لایه‌هایی از کامپوزیت پلیمری و ورق‌های فلزی همانند آلومینیوم آلیاژی می‌باشند که با ترتیب خاصی در کنار یکدیگر چیده شده‌اند. از مهم‌ترین مواردی که در ساخت این کامپوزیت‌ها باید به آن توجه شود، چسبندگی مناسب میان لایه کامپوزیتی و ورق فلزی است. عدم چسبندگی مناسب، باعث افت خواص کامپوزیت‌های FML می‌شود. از این رو همواره در تقویت خواص مکانیکی و فیزیکی این کامپوزیت‌ها باید به فصل مشترک میان لایه کامپوزیتی و ورق فلزی و برهمکنش‌های موجود در این منطقه توجه ویژه‌ای داشت [۲،۳]. استفاده از ترموپلاست‌ها مانند پلی اتر ایمید[3] به عنوان چسب، افزایش چسبندگی بین کامپوزیت پلیمری و ورق فلزی را به دنبال دارد، ولی باعث کاهش چقرمگی و استحکام خستگی کامپوزیت FML می‌شود. عملیات مکانیکی نیز به منظور حذف لایه اکسیدی روی سطح آلومینیوم انجام می‌گیرد و باعث ایجاد یک سطح زبر با اندازه تخلخل‌های ماکرو می‌شود. عملیات شیمیایی به منظور چربی‌زدایی و حذف لایه روی سطح آلومینیوم انجام می‌پذیرد. عملیات الکتروشیمیایی نیز لایه اکسیدی روی سطح آلومینیوم ایجاد می‌کند که شامل میزان زیادی از تخلخل در مقیاس میکرو است. فرآیندهای چربی‌زدایی، حذف لایه اکسیدی و ایجاد سطح زبر، افزایش قفل مکانیکی و انتقال بهتر بار را به همراه دارند [۳،۴].

در ساخت کامپوزیت‌ها، یکی از محدودیت‌ها از دست رفتن برخی خواص در صورت افزایش خواص دیگر می‌باشد. بدین معنی که با افزایش مقدار یک جزء در کامپوزیت، ویژگی‌های وابسته به آن تقویت می‌شود، اما برخی از خواص دیگر کاهش می‌یابد [5]. تقویت‌کننده‌های نانومتری به علت داشتن ابعاد بسیار کوچک و نسبت سطح به حجم زیاد در مقایسه با تقویت‌کننده‌های معمولی میکرونی، باعث بهبود چشمگیری در خواص مختلف پلیمرها می‌شوند. علت اصلی برتری نانوکامپوزیت‌ها بر کامپوزیت‌های معمولی آن است که در این مواد، افزایش یک خاصیت سبب کاهش خواص دیگر نمی‌شود و حتی در بسیاری از موارد افزایش همه خواص مکانیکی نیز گزارش شده است [6]. استفاده از نانوذرات، باعث ایجاد میکرومکانیزم‌هایی مانند انحراف ترک [7]، قفل شدن ترک [8] و ایجاد میکروترک‌ها [9] در هنگام برخورد با کلوخه نانوذرات می‌شود که افزایش چقرمگی کامپوزیت‌های زمینه پلیمری را به دنبال دارد [10].

گرافن بدون نقص با استحکام 130 گیگاپاسکال، مدول یانگ 1 تراپاسکال و رسانایی حرارتی و الکتریکی بسیار بالا به عنوان مستحکم‌ترین ماده جهان شناخته شده است. سطح ویژه گرافن برابر با 2630 مترمربع بر گرم می‌باشد که بسیار بیشتر از سطح ویژه نانولوله کربنی بوده و از این رو برهمکنش بیشتری با مواد اطراف خود دارد. ویژگی‌های ذاتی گرافن آن را به تقویت کننده‌ای مناسب برای کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تبدیل نموده است. مطابق با مطالعاتی که تاکنون صورت گرفته، گرافن بیش از دیگر تقویت‌کننده‌های کربنی در افزایش خواص نانوکامپوزیت زمینه پلیمری تأثیر داشته است. تأثیر گرافن بر افزایش خواص مکانیکی در تمام زمینه‌ها از جمله خواص خمشی، کششی، خستگی، فشاری و ضربه مثبت می‌باشد. به صورت میانگین، افزودن گرافن به مقداری حدود کمتر از 0/25 درصد وزنی سبب افزایش 30 درصدی در چقرمگی کامپوزیت با زمینه اپوکسی می‌شود. البته مقدار بهبود خواص به تعداد لایه‌های گرافن، قطر صفحات، عوامل شیمیایی موجود بر روی سطح گرافن و نحوه پراکنده‌سازی گرافن در زمینه وابسته است [12،11].

در پژوهشی، بولوت [13] به بررسی تأثیر افزودن گرافن بر خواص مکانیکی کامپوزیت اپوکسی/ الیاف بازالت پرداخته است. نتایج نشان داد که گرافن دارای بیشترین اثر در درصد وزنی 0/1 می‌باشد، به طوری‌که استحکام خمشی، مدول خمشی و مقاومت به ضربه در این حالت، به ترتیب 30/2، 67/9 و 26/4 درصد نسبت به نمونه بدون گرافن افزایش یافتند.

کامار و همکاران [14] تأثیر گرافن بر افزایش خواص مکانیکی بین لایه‌ای کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف شیشه را

[1] Delft
[2] Fiber Metal Laminate
[3] Polyetherimide

www.SID.ir

Archive of SID

مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که با افزودن 0/25 درصد وزنی گرافن به زمینه، استحکام خمشی به میزان 29 درصد افزایش می‌یابد. همچنین نانوکامپوزیت با همین درصد گرافن 25 درصد افزایش در چقرمگی را در آزمون چقرمگی شکست با حالت شکست 1 نشان داد.

محمود و همکاران [15] الیاف شیشه را توسط اکسید گرافن در ولتاژهای مختلف با استفاده از روش رسوب‌دهی الکتروفورز[1] پوشش دادند. در این حالت، استحکام کششی و برشی بین لایه‌ای کامپوزیت زمینه اپوکسی تقویت‌شده با این الیاف به ترتیب 25 و 219 درصد افزایش یافت. علت بهبود در خواص، اصلاح شدن سطح الیاف توسط اکسید گرافن به جهت پیوند بهتر با اپوکسی گزارش شد. همچنین پوشش دادن الیاف با نانوذرات سبب افزایش ناهمواری سطح آنان نیز شده که این موضوع نیز موجب بهبود چسبندگی می‌شود.

لاوکوک و همکاران [16] پیرامون تأثیرات چسبندگی اتصال بین آلومینیوم و کامپوزیت پیش‌آغشته بر خواص مکانیکی چندلایه‌های الیاف/ فلز تقویت شده با الیاف کربن مطالعه کردند. نتایج نشان داد، خواص مکانیکی از جمله استحکام و مدول کششی نمونه با آلومینیوم اصلاح سطحی شده نسبت به نمونه با آلومینیوم بدون اصلاح سطحی بسیار بالاتر است. استحکام برشی بین‌لایه‌ای در چندلایه‌های الیاف/ فلز بدون اصلاح سطحی آلومینیوم، تحت آزمون‌های خمش سه نقطه و پنج نقطه حدود 10 درصد کمتر از نمونه با آلومینیوم اصلاح سطحی شده می‌باشد.

بهاری و همکاران [17] تأثیر افزودن نانورس بر خواص خمشی و ضربه سرعت بالای کامپوزیت‌های FML حاوی الیاف بازالت را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها مشاهده کردند، بیشترین خواص خمشی و ضربه در افزودن نانورس با 3 درصد وزنی به دست می‌آید. همچنین دریافتند که نانورس اصلاح شده نسبت به اصلاح نشده باعث بهبود بیشتر این خواص می‌شود که علت آن توزیع یکسان نانوذرات در وضعیت اصلاح شده است.

واریر و همکاران [18] تأثیر افزودن نانولوله کربنی بر رفتار فیزیکی و مکانیکی کامپوزیت‌های FML حاوی الیاف شیشه را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها دریافتند که افزودن نانولوله کربنی باعث افزایش ضریب انبساط حرارتی، دمای انتقال شیشه‌ای پلیمر و چقرمگی شکست می‌شود. همچنین مشاهده کردند، بیشترین نیروی ضربه مربوط به نمونه FML با 0/5 درصد وزنی نانولوله کربنی در مقایسه با سایر نمونه‌ها می‌باشد.

[1] Electrophoretic deposition

تاکنون تحقیقات بسیار کمی مبنی بر استفاده از نانوذرات در سازه‌های الیاف/ فلز و تأثیر آن روی برهمکنش اجزای تشکیل دهنده در فصل مشترک انجام شده است. هدف از این پژوهش، بررسی تأثیر افزودن گرافن بر رفتار ضربه شارپی کامپوزیت‌های لایه‌ای الیاف- فلز شامل ورق‌های آلومینیوم 2024-T3 و کامپوزیت زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف هیبریدی کولار و شیشه می‌باشد. در کامپوزیت‌های FML مذکور، لایه‌های فلزی به منظور افزایش چسبندگی کامپوزیت پلیمری و ورق فلزی، اصلاح سطحی شدند. بر این اساس، نوآوری تحقیق حاضر نسبت به تحقیقات پیشین، بررسی تأثیر اصلاح سطحی آلومینیوم و افزودن نانوصفحات گرافن بر خواص ضربه‌ای کامپوزیت‌های الیاف/ فلز و همچنین بررسی رفتار فصل مشترک آن می‌باشد.

2- بخش تجربی

2-1- مواد

در تحقیق حاضر، رزین اپوکسی اپون[2] 828 همراه با هاردنر پلی آمینی[3] تتا[4] به عنوان زمینه کامپوزیت مورد استفاده قرار گرفتند. طبق استاندارد ASTM D445، در دمای 25 °C، گرانروی این رزین 150-110 پواز و چگالی آن 1/16 g/ml می‌باشد [19]. پارچه هیبریدی بافته شده از الیاف شیشه و کولار با بافت ساده از شرکت لیوراد[5] تهیه شد. همچنین از ورق آلومینیوم 2024-T3 با ضخامت 0/5 میلی‌متر جهت ساخت چندلایه‌های الیاف/ فلز استفاده شد. نانوصفحات گرافن از شرکت تحقیقات نانومواد یواس[6] با مشخصات 99/5 درصد، 3-6 لایه و سطح ویژه m^2/g 500-1200 تهیه شدند. شکل 1، تصویر میکروسکوپ الکترون روبشی (SEM)[7] نانوصفحات گرافن را نشان می‌دهد.

2-2- اصلاح سطحی آلومینیوم 2024-T3

قبل از لایه‌گذاری کامپوزیت، به منظور بهبود چسبندگی سطحی بین آلیاژ آلومینیوم و کامپوزیت پلیمری، عملیات آماده‌سازی سطحی FPL[8] بر روی آلیاژهای آلومینیوم انجام گرفت.

بدین منظور، در ابتدا سطح ورق آلومینیوم با استون پاک شده و سپس در محلول هیدروکسید سدیم غوطه‌ور و پس از آن با آب مقطر شستشو داده شد. در مرحله بعد، ورق آلومینیوم در محلول

[2] Epon
[3] Polyamine Hardener
[4] TETA (EPIKURE 3234)
[5] Liverad
[6] US Research Nanomaterial
[7] Scanning Electron Microscope
[8] Forest Products Laboratory

www.SID.ir

Archive of SID

سدیم دی‌کرومات و اسید سولفوریک (مطابق با استاندارد ASTM D2674) قرار گرفت و در نهایت با آب مقطر شستشو شد.

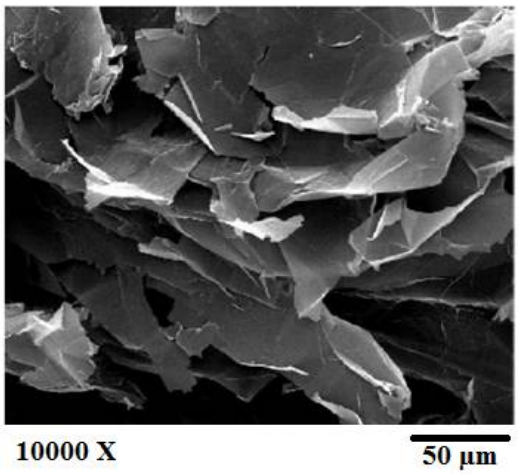

Fig. 1 SEM image of graphene nanoplates.

شکل 1 تصویر SEM از نانوصفحات گرافن.

2-3- تجهیزات مورد استفاده جهت توزیع گرافن در اپوکسی

به منظور توزیع نانوذرات در زمینه اپوکسی از دستگاه هم‌زن مکانیکی اورهد[1] مدل SDS-11D ساخت شرکت فینتک[2] کره جنوبی استفاده شد. همچنین به منظور پخش بهتر نانوذرات در زمینه اپوکسی از دستگاه همگن‌کننده فراصوت ساخت شرکت فناوری ایرانیان پژوهش نصیر (فاپن[3]) استفاده شد. منظور از مفهوم پخش نانوذرات، شکستن آگلومره‌های موجود در داخل رزین است که به دلیل سطح انرژی بسیار بالای نانوذرات ایجاد می‌شوند.

2-4- ساخت نمونه‌ها

برای ساخت نمونه‌های کامپوزیت الیاف/ فلز، ابتدا مخلوط‌هایی از رزین اپوکسی با درصدهای وزنی 0، 0/25، 0/5 و 1 از گرافن به ترتیب به مدت 15 و 60 دقیقه تحت عملیات همزدن مکانیکی و آلتراسونیک قرار گرفتند. پس از پراکنده شدن گرافن در زمینه، این مخلوط و هاردنر با نسبت وزنی 100 به 10 (به توصیه شرکت سازنده) با یکدیگر مخلوط شده و به مدت 5 دقیقه هم زده شدند.

در ساخت نمونه‌های کامپوزیتی، رزین حاوی گرافن و 4 لایه پارچه هیبرید الیاف شیشه/ کولار با بافت ساده و با نسبت حجمی رزین به الیاف (35 به 65) بکار گرفته شد که در آن تعداد لایه‌ها و جهت‌گیری‌های الیاف مورد استفاده در همه نمونه‌ها یکسان بود. کامپوزیت پلیمری بدست آمده با ضخامت میانگین 0/8 mm بین دو لایه آلومینیوم 2024-T3 (با ضخامت هر کدام 0/5 mm)، قرار گرفت. به منظور پخت نهایی نمونه‌ها، کامپوزیت‌های بدست آمده با ابعاد mm^3 90×15×1/8 در قالب طراحی شده برای ساخت کامپوزیت الیاف/ فلز به مدت 18 ساعت در دمای °C 25 قرار گرفتند. سپس، برای دست‌یابی به حداکثر میزان استحکام، نمونه‌های کامپوزیت‌های الیاف/ فلز ساخته شده به مدت یک هفته در دمای اتاق پخت شدند. شکل 2 تصویر نحوه ساخت نمونه‌های FML درون قالب (شامل دو صفحه آلومینیومی رویی و زیرین) را نشان می‌دهد. این نمونه‌ها از قالب خارج شده و پس از برش و حذف حاشیه اطراف ورق آلومینیوم، تحت آزمون ضربه شارپی قرار گرفتند.

2-5- بررسی میکروسکوپی نمونه‌ها

به منظور بررسی سطح آلومینیوم اصلاح سطحی شده، فصل مشترک کامپوزیت پلیمری و آلومینیوم و همچنین سطوح شکست کامپوزیت الیاف/ فلز، میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی[4] (FESEM) مدل وگا تی‌ای‌اسکن[5] و میکروسکوپ میکروسکوپ نوری میجی تکنو[6] مدل IM 7200 مورد استفاده قرار گرفتند.

2-6- آزمون ضربه شارپی

برای آزمون ضربه شارپی از دستگاه سنتام[7] مدل STI- 200B، با ظرفیت 200 ژول و قابلیت اندازه‌گیری با دقت 0/1 ژول استفاده شد. این آزمون با تکرار 3 نمونه برای هر درصد از گرافن در دمای محیط انجام پذیرفت.

Fig. 2 Fabricating of FML samples in mold.

شکل 2 ساخت نمونه‌های FML درون قالب.

[1] Overhead
[2] Fintek
[3] Fapan

[4] Field Emission Scanning Electron Microscopy
[5] VEGA TESCAN-LMU
[6] Meiji Techno
[7] Santam

www.SID.ir

Archive of SID

3- نتایج و بحث

3-1- بررسی اصلاح سطحی ورق آلومینیوم

جهت بهبود چسبندگی ورق آلومینیوم به لایه کامپوزیتی، عملیات اصلاح سطح شیمیایی بر روی ورق آلومینیوم صورت گرفت. با انجام عملیات اصلاح سطحی و ایجاد ناهمواری‌های میکروسکوپی بر روی سطح آلومینیوم، امکان نفوذ زنجیره‌های پلیمری به ورق افزایش یافته و چسبندگی بهبود می‌یابد. افزایش چسبندگی باعث افزایش قفل مکانیکی بین کامپوزیت پلیمری و آلومینیوم می‌شود که انتقال بهتر بار را به همراه دارد. این عوامل، باعث بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت‌های FML می‌شوند. شکل 3، تصویر میکروسکوپی سطح آلومینیوم پس از عملیات اصلاح سطحی FPL را نشان می‌دهد که مکان‌های سیاه رنگ، حاصل خوردگی ایجاد شده توسط محلول FPL می‌باشند. این حفرات مکان‌های مناسبی جهت نفوذ رزین و زنجیره‌های پلیمری هستند.

3-2- بررسی رفتار ضربه شارپی کامپوزیت‌ها

شکل 4، تأثیر افزودن نانوصفحات گرافن بر استحکام ضربه FML تحت آزمون ضربه شارپی را نشان می‌دهد. میزان استحکام ضربه در نمونه بدون نانوذرات، 251 Jm^2/g است که با افزودن 0/25 درصد وزنی نانوصفحات گرافن، 34/22 درصد کاهش یافته و به 187 Jm^2/g می‌رسد. در کامپوزیت‌هایی با 0/5 و 1 درصد وزنی از نانوصفحات گرافن، استحکام ضربه تا 177 Jm^2/g و 155 کاهش می‌یابد که برابر با 41/8 و 58/86 درصد کاهش نسبت به نمونه بدون گرافن است.

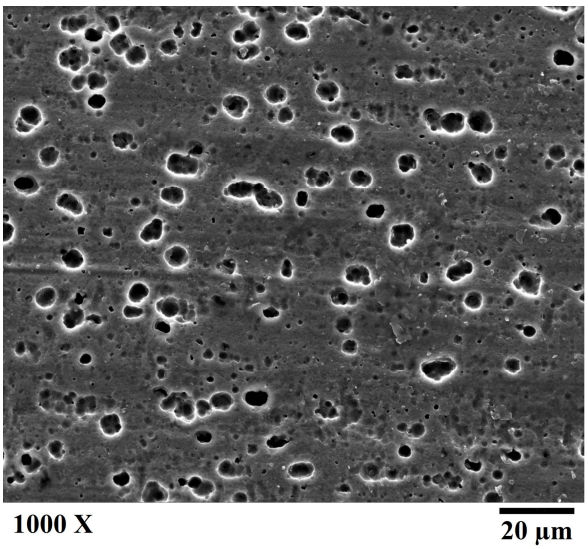

Fig. 3 FESEM image of aluminium surface after FPL surface modification.

شکل 3 تصویر FESEM از سطح آلومینیوم پس از اصلاح سطحی FPL

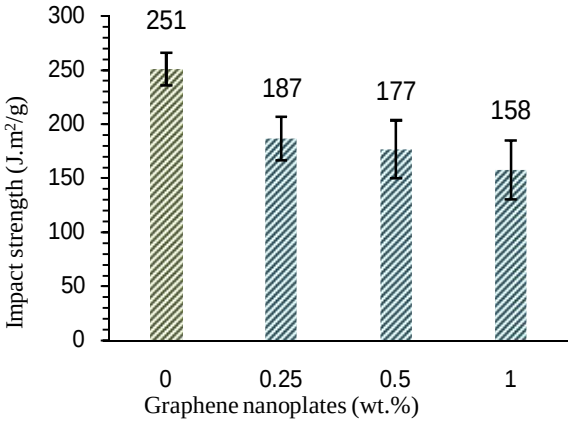

Fig. 4 The effect of graphene nanoplates on the impact strength behavior of FML Charpy impact test.

شکل 4 تأثیر نانوصفحات گرافن بر رفتار استحکام ضربه FML در آزمون ضربه شارپی.

از آنجایی که گرافن، نانوذره‌ای با خواص مکانیکی بسیار بالا می‌باشد، لذا انتظار بر این است تا در این نمونه‌ها درصد بهینه‌ای برای دستیابی به خواص مطلوب و خواصی که بهتر از نمونه فاقد گرافن باشد، دیده شود.

در تحقیقات چاندراسکاران و همکاران [20]، افزودن نانوصفحات گرافن و نانواکسید گرافن احیا شده به روش حرارتی (TRGO)[1] سبب افزایش چقرمگی شکست در آزمون خمش سه نقطه‌ای نمونه شیاردار شد. با افزایش هر دو نانوذره تا مقدار 0/5 درصد وزنی، افزایش در چقرمگی مشاهده شده و برای درصدهای بیشتر (بیشتر از 1 درصد وزنی) چقرمگی کاهش یافت. مطابق با مطالعات رفیعی و همکاران [۲۲،۲۱]، تقویت اپوکسی با گرافن عامل‌دار به میزان 0/125 درصد وزنی سبب افزایش 65% در چقرمگی شکست شده است. این محققان پی بردند که با افزودن گرافن عامل‌دار به زمینه، سطح شکست به میزان دو برابر نسبت به اپوکسی خالص افزایش می‌یابد. افزایش در سطح شکست که متناسب با افزایش زبری سطح است، از منحرف شدن ترک توسط صفحات گرافن نتیجه می‌شود.

حسینی و همکاران [23] تأثیر نانوصفحات گرافن بر خواص خمشی کامپوزیت‌های پلیمری حاوی الیاف بازالت را بررسی کردند. آن‌ها دریافتند با افزایش درصد وزنی نانوذرات تا 0/4 درصد وزنی، خواص خمشی به‌طور چشم‌گیری افزایش پیدا می‌کند و در درصدهای بالاتر کاهش می‌یابد. در پژوهشی دیگر [24] آن‌ها مشاهده کردند با افزایش درصد وزنی نانوصفحات

[1] Thermal Reduced Graphene Oxide

www.SID.ir

Archive of SID

گرافن استحکام ضربه‌ای کامپوزیت‌های پلیمری حاوی الیاف بازالت افزایش می‌یابد. به طوری‌که در 0/4 درصد وزنی گرافن، استحکام ضربه نسبت به نمونه بدون نانوصفحات گرافن، 75% افزایش نشان می‌دهد.

اما در پژوهش حاضر نه‌تنها بهبودی در استحکام ضربه مشاهده نشد، بلکه استحکام ضربه با شیب بسیار زیادی پس از افزودن 0/25 درصد وزنی گرافن کاهش یافت. علت اصلی این تفاوت می‌تواند بررسی FML در این تحقیق در مقایسه با تحقیقات قبلی باشد که روی کامپوزیت پلیمری متمرکز بوده‌اند. از تفاوت‌های اساسی کامپوزیت‌های الیاف/ فلز با کامپوزیت‌ها یا نانوکامپوزیت‌های زمینه پلیمری، وجود ورق فلزی در کامپوزیت‌های الیاف/ فلز و مسئله چسبندگی میان ورق فلزی و لایه کامپوزیتی و یا نانوکامپوزیتی می‌باشد. لذا در این کامپوزیت‌ها علاوه بر خواص هر یک از دو جز فلز و کامپوزیت، باید به طور ویژه‌ای به خواص فصل مشترک این دو جز و همچنین نحوه برهمکنش آن‌ها نیز توجه شود. از آنجایی که بهبود خواص مکانیکی توسط افزودن گرافن به کامپوزیت‌ها با پژوهش‌هایی که تاکنون صورت گرفته به اثبات رسیده است، لذا تنها موردی که عدم بهبود رفتار کامپوزیت‌های الیاف/ فلز را می‌تواند رقم بزند تضعیف خواص فصل مشترک میان کامپوزیت و ورق آلومینیوم در اثر افزوده شدن گرافن می‌باشد.

3-3- بررسی سطوح شکست کامپوزیت‌های الیاف/ فلز

شکل 5، چهار نمونه کامپوزیت الیاف/ فلز انتخاب شده با درصدهای وزنی مختلف از گرافن را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل 5- الف مشاهده می‌شود، با افزایش درصد وزنی گرافن میزان جدایش ورق آلومینیوم از لایه کامپوزیتی و همچنین رفتار ترد افزایش می‌یابد. در نمونه شماره 1، جدایش ورق آلومینیوم از لایه کامپوزیتی رخ نداده است، در حالی‌که به ترتیب با افزایش مقدار گرافن تا 1 درصد وزنی، جدایش آلومینیوم از لایه کامپوزیتی به طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر می‌شود. در واقع واضح است که فصل مشترک میان ورق فلزی و لایه کامپوزیتی با استفاده از گرافن و همچنین افزایش مقدار استفاده از آن تضعیف می‌شود. همچنین شکل 5- ب تصویر واضح‌تری از نوع شکست و میزان تخریب ایجاد شده در مقیاس ماکروسکوپی را در اختیار می‌گذارد. مشاهده می‌شود که با حرکت از نمونه شماره 1 به سمت نمونه 4 میزان رفتار ترد و همچنین میزان تورق و تخریب (که با فلش‌های زرد رنگ نشان داده شده است) در لایه کامپوزیتی افزایش می‌یابد. در نمونه شماره 1 (که فاقد گرافن است)، لایه کامپوزیتی سالم مانده و شکست ترد رخ نداده است.

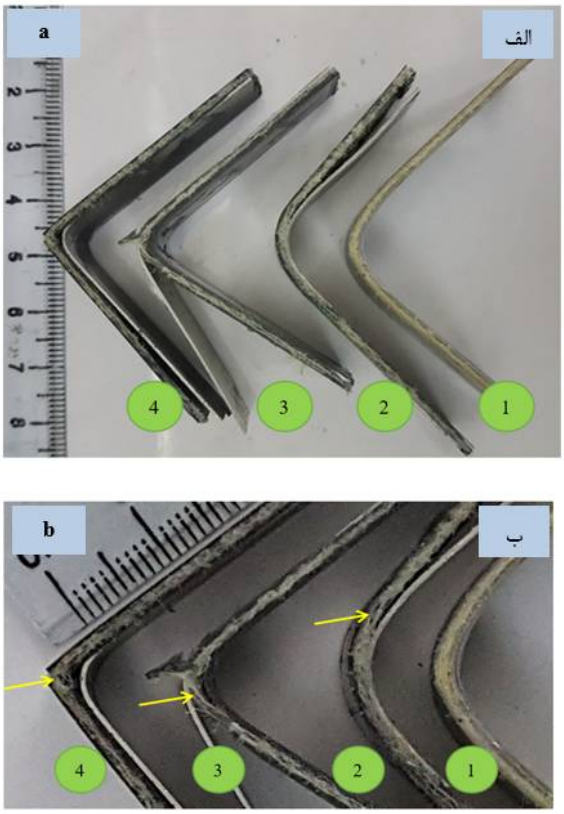

Fig. 5 The side view of FMLs after charpy impact test, a) no magnifying, b) by magnifying (Numbers 1, 2, 3 and 4 show respectively, FMLs contains of without, 0.25, 0.5, 1 wt.% of graphene nanoplates).

شکل 5 نمای جانبی FML پس از آزمون ضربه شارپی، الف) بدون بزرگنمایی، ب) با بزرگنمایی (شماره‌های 1، 2، 3 و 4 به ترتیب FML فاقد، حاوی 0/25، 0/5 و 1 درصد وزنی نانوصفحات گرافن را نشان می‌دهند).

در واقع در این نمونه تلفیق خواص ورق آلومینیوم و لایه کامپوزیتی مشاهده می‌شود که هدف اصلی از ساخت کامپوزیت‌های الیاف/ فلز می‌باشد. در نمونه‌های بعدی و به ویژه با افزایش مقدار گرافن در نمونه‌های 2، 3 و 4 میزان تورق و تخریب و همچنین شکست ترد در لایه کامپوزیتی به طور مشهود افزایش می‌یابد. این نتیجه ناشی از عدم چسبندگی مناسب میان ورق فلزی و لایه کامپوزیتی است که سبب این شده تا لایه کامپوزیتی به طور مجزا عمل نموده و رفتار ترد از خود نشان دهد.

شکل 6، تصاویر میکروسکوپی سطح شکست نمونه‌های FML از محل تحت ضربه را نشان می‌دهد. شکل 6- الف، نشان دهنده نمونه فاقد گرافن است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تخریب چندانی در فصل مشترک و همچنین در ورق فلزی و لایه کامپوزیتی مشاهده نمی‌شود و تنها کامپوزیت الیاف/ فلز در

www.SID.ir

Archive of SID

این ناحیه خم شده است.

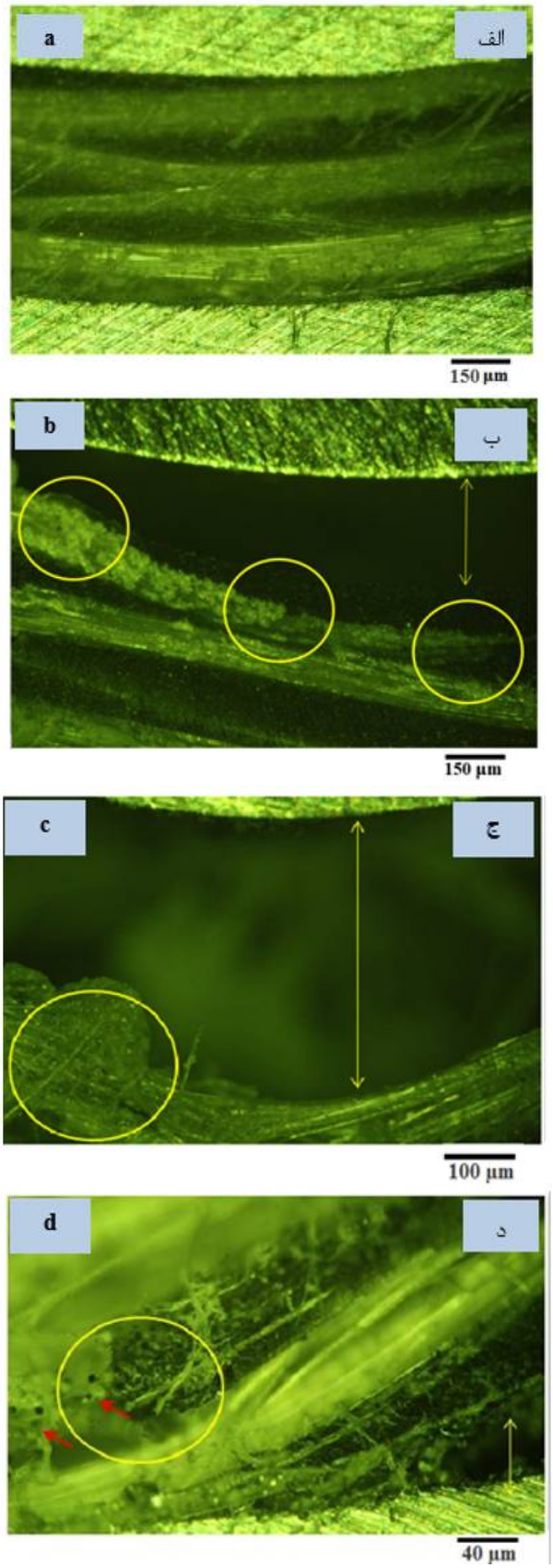

Fig. 6 Optical microscopy images of cross-section of FML containing of graphene nanoplates, a) 0% wt.%, b) 0.25 wt.%, c and d) 0.5 wt.%.

شکل 6 تصاویر میکروسکوپ نوری از نمای جانبی FML شامل نانوصفحات گرافن، الف) 0 درصد وزنی، ب) 0.25 درصد وزنی، ج و د) 0.5 درصد وزنی.

این تصویر بیانگر چسبندگی مناسب کامپوزیت پلیمری و ورق آلومینیومی می‌باشد. شکل 6- ب، ناحیه تحت ضربه در نمونه حاوی 0/25 درصد وزنی گرافن را نشان می‌دهد. پیکان زرد رنگ، فاصله جدایش ایجاد شده میان ورق آلومینیومی و لایه کامپوزیتی و همچنین دوایر زرد رنگ، لایه کامپوزیتی دچار تخریب را نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در میان اجزاءِ لایه کامپوزیتی (که شامل پارچه الیاف و لایه رزین اپوکسی حاوی گرافن است)، چسبندگی وجود دارد، اما به طور کلی چسبندگی میان لایه کامپوزیتی و ورق فلزی در این نمونه نسبت به نمونه فاقد گرافن کمتر شده است. تنها دلیل تضعیف فصل مشترک به افزودن گرافن باز می‌گردد، چرا که تنها تفاوت در نمونه، وجود گرافن و همچنین مقدار آن می‌باشد. تصاویر ج و د از شکل 6 نیز ناحیه تحت ضربه کامپوزیت FML حاوی 0/5 درصد وزنی گرافن را نشان می‌دهند. پیکان زرد رنگ در این تصاویر بیانگر جدایش میان ورق فلزی و لایه کامپوزیتی است. همچنین دایره زرد رنگ، مکان‌های شکست و تخریب الیاف و لایه کامپوزیتی و پیکان‌های قرمز، مکان کلوخه‌های گرافن (به شکل کره‌های سیاه رنگ) را نشان می‌دهند. کلوخه‌های گرافن در رزین اپوکسی و همچنین بر روی سطح ورق آلومینیومی وجود دارند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، این کلوخه‌ها ابعاد میکرومتری داشته و می‌توانند به عنوان مکان‌هایی برای رشد ترک و ایجاد جدایش میان ورق آلومینیومی و لایه کامپوزیتی محسوب شوند.

3- 4- بررسی سطح آلومینیوم بعد از آزمون ضربه شارپی

شکل 7، تصاویر میکروسکوپ الکترونی سطح آلومینیوم در نمونه‌های FML پس از آزمون ضربه شارپی را نشان می‌دهد که در اثر ضربه و جدایش از لایه کامپوزیتی جدا شده‌اند. در نمونه فاقد گرافن (شکل 7- الف)، چسبندگی مناسب تکه‌های کامپوزیت پلیمری بر روی آلومینیوم بعد از آزمون ضربه مشخص است. زمانی‌که نفوذ پلیمر در تخلخل‌های آلومینیوم بهتر صورت گیرد، قفل مکانیکی بین پلیمر و آلومینیوم افزایش می‌یابد که انتقال بهتر بار به زمینه و افزایش خواص مکانیکی را به دنبال دارد. در شکل 7- ب، با توجه به شفافیت پلیمر استفاده شده در کامپوزیت FML، یک لایه رزین بر روی سطح آلومینیوم قرار دارد و آن را پوشانده است که این موضوع بیانگر چسبندگی مناسب رزین با آلومینیوم می‌باشد. همچنین حفرات موجود در آلومینیوم که پشت لایه پلیمری قرار دارد به وضوح دیده می‌شوند.

www.SID.ir

Archive of SID

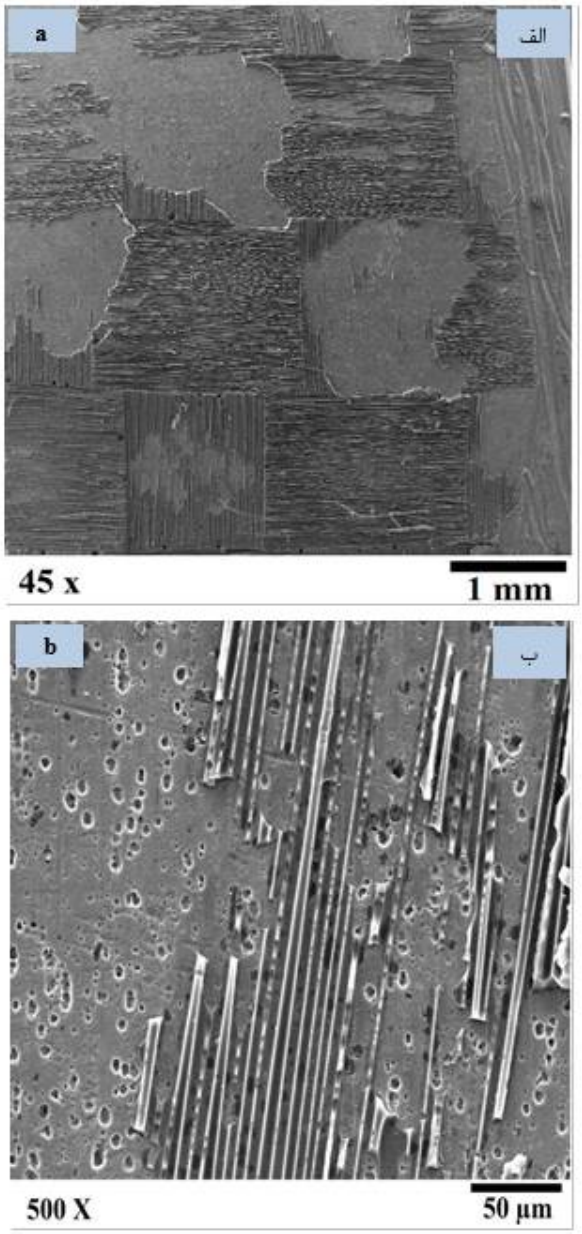

Fig. 7 FESEM images of fracture surfaces of FML with 0 wt.% graphene, a) with magnification of 45 times, b) with magnification of 500 times.

شکل 7 تصاویر FESEM از سطح شکست FML با صفر درصد وزنی گرافن، الف) با بزرگنمایی 45 برابر، ب) با بزرگنمایی 500 برابر.

شکل 8، تصاویر میکروسکوپی از سطح شکست کامپوزیت FML حاوی 0/5 درصد وزنی گرافن بعد از آزمون ضربه شارپی را نشان می‌دهد. شکل 8- الف، نشان می‌دهد که پر شدن تخلخل‌های آلومینیوم اصلاح سطحی شده توسط نانوصفحات گرافن از نفوذ پلیمر به داخل تخلخل‌ها و ایجاد پیوند مکانیکی بین کامپوزیت پلیمری و آلومینیوم جلوگیری می‌کند.

از آنجایی که پیوند میان لایه‌های گرافن از نوع واندروالس و ضعیف می‌باشد، لذا امکان تورق در میان لایه‌های گرافن نیز بسیار ممکن و آسان است.

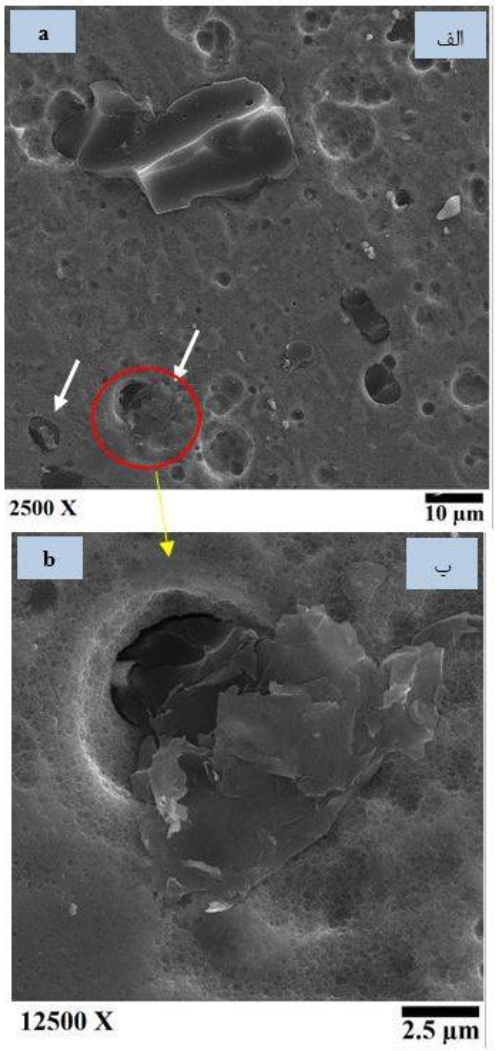

Fig. 8 FESEM images of fracture surfaces of FML with 0.5 wt.% graphene, a) with magnification of 2500 times, b) with magnification of 12500 times.

شکل 8 تصاویر FESEM از سطح شکست FML با 0/5 درصد وزنی گرافن، الف) با بزرگنمایی 2500 برابر، ب) با بزرگنمایی 12500 برابر.

ترک می‌تواند در سطح شروع شده و با عبور از میان لایه‌های گرافن موجب جدایش میان ورق آلومینیوم و لایه کامپوزیتی شود. بنابراین در نمونه فاقد گرافن، رزین بهتر درون حفرات ایجاد شده در سطح آلومینیوم نفوذ می‌کند، اما در نمونه حاوی گرافن، صفحات گرافن کسر قابل توجهی از حفرات را پر کرده و برهمکنش رزین با آلومینیوم را کاهش می‌دهند. بدیهی است که علت اصلی چسبندگی، برهمکنش میان رزین و آلومینیوم است و اگر مختل شود، جدایش به راحتی اتفاق می‌افتد. مطابق با نتایج مذکور، مشخص است که حضور گرافن در فصل مشترک میان ورق فلزی و لایه کامپوزیتی به صلاح نبوده و سبب کاهش خواص می‌شود. اگرچه استفاده از گرافن در بهبود خواص

www.SID.ir

Archive of SID

کامپوزیت‌های زمینه پلیمری به اثبات رسیده است.

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، رفتار ضربه شارپی کامپوزیت‌های الیاف/ فلز حاوی گرافن و تقویت شده با پارچه هیبرید الیاف شیشه و کولار بررسی شد. بدین منظور، کامپوزیت‌های زمینه اپوکسی- هیبرید الیاف شیشه و کولار/ آلومینیوم 2024-T3 با درصدهای وزنی متفاوت از گرافن (0، 0/25، 0/5 و 1) به روش لایه گذاری دستی ساخته شدند و تحت آزمون ضربه قرار گرفتند. نتایج نهایی بدست آمده از این پژوهش به شرح ذیل هستند:

- استفاده از گرافن سبب کاهش استحکام ضربه در کامپوزیت‌های الیاف/ فلز شد. با افزودن 0/25، 0/5 و 1 درصد وزنی گرافن به اپوکسی، به ترتیب، 34/2، 41/8 و 58/86 درصد کاهش در استحکام ضربه نسبت به نمونه فاقد گرافن مشاهده شد.

- با افزایش مقدار گرافن در کامپوزیت، میزان و احتمال جدایش میان ورق آلومینیومی و لایه کامپوزیتی افزایش یافته و همچنین کامپوزیت الیاف/ فلز از خود رفتار تردتری نشان داد. به این ترتیب که در نمونه‌های فاقد گرافن جدایشی رخ نداد، اما با افزایش درصد گرافن، جدایش بیشتر شده و در نهایت برای نمونه‌های حاوی 1 درصد وزنی گرافن علی رغم جدایش میان ورق فلزی و لایه کامپوزیتی، شکست ترد در کامپوزیت و متعاقباً شکست ورق آلومینیومی مشاهده شد.

- مطابق با تصاویر میکروسکوپی، حضور گرافن و کلوخه‌های آن در فصل مشترک ورق آلومینیوم و لایه کامپوزیتی موجب جوانه‌زنی و رشد ترک شد. همچنین گرافن، حفرات ایجاد شده بر روی سطح آلومینیوم را (که به منظور برهمکنش بهتر با رزین توسط اصلاح سطحی تشکیل شده بودند) پر کرده و مانع از نفوذ رزین اپوکسی و پیوند مناسب میان رزین و آلومینیوم شد.

- به طور کلی اثر مخرب حضور گرافن در فصل مشترک ورق آلومینیوم و لایه کامپوزیتی به این صورت تشریح می‌شود که گرافن، حفرات روی سطح آلومینیوم را پر کرده و مانع از چسبندگی مناسب رزین اپوکسی و ورق آلومینیوم می‌شود. همچنین گرافن های موجود روی سطح آلومینیوم به صورت کلوخه در آمده و همانند مراکز تمرکز تنش و ایجاد ترک رفتار می‌نمایند.

5- مراجع

[1] H. Aghamohammadi, S. N. H. Abbandanak, R.n Eslami-Farsani and S. H. Siadati, Effects of Various Aluminum Surface Treatments on the Basalt Fiber Metal Laminates Interlaminar Adhesion, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 84, pp. 184-193, 2018.

[2] M. Abdollahi Azghan and 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, No. 2, pp. 025302, 2018.

[3] M. Abdollahi Azghan and R. Eslami-Farsani, Experimental Investigation of Effect of Thermal Cycling and Metal Surface Treatment on Flexural Properties Laminate Composite of Aluminium-Epoxy/Basalt Fibers, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 8, pp. 369-376, 2017.

[4] H. F. A. Marzuki, M. Mohamad, E. Ubaidillah, E. Ahmadhilmi, M. N. A. Nordin, Z. Abidin, M. Fadzlee, N. Roslani, Y. M. Junos and S. Omar, Effect of Anodizing on Strength of Carbon-Fibre Aluminium-Laminated Composites, *Advanced Materials Research*, Vol. 748, pp. 216-221, 2013.

[5] B. Fiedler, F. H. Gojny, M. H. Wichmann, M. C. Nolte and K. Schulte, Fundamental Aspects of Nano-Reinforced Composites, *Composites Science and Technology*, Vol. 66, No. 16, pp. 3115-3125, 2006.

[6] P. M. Ajayan, L. S. Schadler and P. V. Braun, Nanocomposite Science and Technology, *John Wiley & Sons*, 2006.

[7] T. Liu, W. C. Tjiu, Y. Tong, C. He, S. S. Goh and T. S. Chung, Morphology and Fracture Behavior of Intercalated Epoxy/Clay Nanocomposites, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 94, No. 3, pp. 1236-1244, 2004.

[8] Zunjarrao, S., Sriraman, R. and Singh, R., Effect of Processing Parameters and Clay Volume Fraction on the Mechanical Properties of Epoxy-Clay Nanocomposites, *Journal of Materials Science*, Vol. 41, No. 8, pp. 2219-2228, 2006.

[9] T. Hsieh, A. Kinloch, K. Masania, A. Taylor and S. Sprenger, The Mechanisms and Mechanics of the Toughening of Epoxy Polymers Modified with Silica Nanoparticles, *Journal of Polymer*, Vol. 51, No. 26, pp. 6284-6294, 2010.

[10] G. Carotenuto, V. Romeo, I. Cannavaro, D. Roncato, B. Martorana and M. Gosso, Graphene-Polymer Composites, *IOP Publishing*, Vol. 40, pp. 12-18, 2012.

[11] X. Huang, X. Qi, , F. Boey and H. Zhang, Graphene-Based Composites, *Chemical Society Reviews*, Vol. 41, No. 2, pp. 666-686, 2012.

[12] J. R. Potts, D. R. Dreyer, C. W. Bielawski and R. S. Ruoff, Graphene-Based Polymer Nanocomposites, *Journal of Polymer*, Vol. 52, No. 1, pp. 5-25, 2011.

[13] M. Bulut, Mechanical Characterization of Basalt/Epoxy Composite Laminates Containing Graphene Nanopellets, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 122, pp. 71-78, 2017.

www.SID.ir

Archive of SID

Applied Science and Manufacturing, Vol. 41, No. 4, pp. 532-538, 2010.

[19] Resin, Epon 828 Data Sheet, Shell Chemical Co., Vol. 60, 2005.

[20] S. Chandrasekaran, C. Seidel and K. Schulte, Preparation and Characterization of Graphite Nano-Platelet (Gnp)/Epoxy Nano-Composite: Mechanical, Electrical and Thermal Properties, *European Polymer Journal*, Vol. 49, No. 12, pp. 3878-3888, 2013.

[21] M. A. Rafiee, J. Rafiee, Z. Wang, H. Song, Z. Yu, and N. Koratkar, Enhanced Mechanical Properties of Nanocomposites at Low Graphene Content, *ACS Nano*, Vol. 3, No. 12, pp. 3884-3890, 2009.

[22] M. A. Rafiee, J. Rafiee, I. Srivastava, Z. Wang, H. Song, Z. Z. Yu and N. Koratkar, Fracture and Fatigue in Graphene Nanocomposites, *ACS Nano*, Vol. 6, No. 2, pp. 179-183, 2010.

[23] S. N. Hosseini Abbandanak, S. M. H. Siadati and R. Eslami-Farsani, Effects of functionalized graphene nanoplatelets on the flexural behaviors of basalt fibers/epoxy composites, *Journal of Science and Technology of Composites*, 2018, (in Persian فارسی).

[24] S.N. Hosseini Abbandanak, S.M.H. Siadati and R. Eslami-Farsani, Graphene Surface Treatment Effects on Mechanical Behavior of Basalt Fibers\ Epoxy Composites, *Iranian Journal of Polymer Science and Technology*, Vol. 31, pp. 155-170, 2018, (in Persian فارسی).

[14] N. T. Kamar, M. M. Hossain, A. Khomenko, M. Haq, L. T. Drzal and A. Loos, Interlaminar Reinforcement of Glass Fiber/Epoxy Composites with Graphene Nanoplatelets, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 70, pp. 82-92, 2015.

[15] H. Mahmood, M. Tripathi, N. Pugno and A. Pegoretti, Enhancement of Interfacial Adhesion in Glass Fiber/Epoxy Composites by Electrophoretic Deposition of Graphene Oxide on Glass Fibers, *Composites Science and Technology*, Vol. 126, pp. 149-157, 2016.

[16] G. Lawcock, L. Ye, Y. W Mai and C.T. Sun, The Effect of Adhesive Bonding between Aluminum and Composite Prepreg on the Mechanical Properties of Carbon-Fiber-Reinforced Metal Laminates, *Composites Science and Technology*, Vol. 57, No. 1, pp. 35-45, 1997.

[17] F. Bahari-Sambran, R. Eslami-Farsani and S. Chirani Arbab, The Flexural and Impact Behavior of the Laminated Aluminum-Epoxy/Basalt Fibers Composites Containing Nanoclay: An Experimental Investigation, *Journal of Sandwich St*ructures & Materials, pp. 1-21, First Published August 4, 2018.

[18] A. Warrier, A. Godara, O. Rochez, L. Mezzo, F. Luizi, L. Gorbatikh, S. V. Lomov, A. W. VanVuure and I. Verpoest, The Effect of Adding Carbon Nanotubes to Glass/Epoxy Composites in the Fibre Sizing and/or the Matrix, *Composites Part A:*

www.SID.ir