ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2022;22(02):71-79

Experimental Investigation of the Effect of natural Microfibers on the Mode I Fracture Toughness of Plain-Woven Laminated Composites

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Zeinolabedin-Beygi A. [1],
Salamat-Talab M. [2*],
Farrokh-Abadi A. [3],
Moslemi Naeini H. [4]

How to cite this article
Zeinolabedin-Beygi A, Salamat-Talab M, Farrokh-Abadi A, Moslemi Naeini H. Experimental Investigation of the Effect of natural Microfibers on the Mode I Fracture Toughness of Plain-Woven Laminated Composites. Modares Mechanical Engineering. 2022;22(02):71-79.

[1] Master of Science Student, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
[2] Assistant professor, Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran
[3] Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
[4] Professor, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

Correspondence
Address: Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran.
P.O.Box: 38181- 41167
m.salamattalab@gmail.com

Article History
Received: June 11, 2021
Accepted: August 25, 2021
ePublished: November 30, 2022

ABSTRACT

In the present study, the effect of natural microfibers (cork particles) on the mode I fracture toughness of plain-woven laminated composites has been investigated. For this purpose, double cantilever beam (DCB) specimens were manufactured using the hand lay-up method with a stacking sequence of $[0]_{28}$. To investigate the effect of cork particles on fracture toughness, samples with two different weight percentages (1% by weight and 3% by weight) were manufactured and the experimental results were compared with one obtained from a sample with pure epoxy resin. Experimental results show that as the amount of cork particles increases, the onset of crack growth requires more energy. The amount of improvement in initiation fracture toughness for the DCB sample with 1% and 3% cork weight has been increased by 67.15% and 71.96%, respectively which is due to the role of the cork in the resin-rich area near the crack tip that arrested the delamination growth. Unlike the initiation fracture toughness, the propagation value is reduced by adding cork particles to the resin. During delamination growth, due to the agglomeration of microfiber at delamination interface and the role of stress concentration of these particles, hence, micro-cork fibers have not been able to increase the propagation fracture toughness and in some cases have slightly reduced the propagation fracture toughness of the delamination. Also, in order to investigate the mechanisms of damage, the fracture surfaces of the samples were scanned using scanning electron microscopy.

Keywords Micro Cork Particles, Mode l Fracture, Double Cantilever Beam, Delamination, Laminated Composite

CITATION LINKS

[1] Interlaminar crack propagation in...[2] Influence of carbon nanotube reinforcement on the processing and...[3] Glass-fibre-reinforced composites with enhanced mechanical and...[4] Mode I and mode II fracture toughness of E-glass non-crimp fabric...[5] The effect of adding carbon nanotubes to...[6] Experimental investigation of the influence of adding carbon nanotubes on...[7] Enhancement of mechanical performance of epoxy/carbon fiber... [8] Fabrication and multifunctional properties of a hybrid laminate...[9] Enhanced fracture properties of carbon reinforced composites...[10] Manufacturing carbon nanofibers toughened polyester/glass fiber composites...[11] Mechanical properties of CFRP laminates manufactured from...[12] Fracture toughness improvement of CFRP...[13] Mode I interlaminar fracture behavior and...[14] Enhanced fracture toughness of carbon fabric/epoxy...[15] An experimental investigation on mode-II interlaminar fracture... [16] Improving interlaminar fracture toughness...[17] Enhancing fracture toughness of glass/epoxy composites...[18] Toughening of carbon fibre reinforced polymer composites with...[19] Multi-scale reinforcement of CFRPs using...[20] On the improvement of toughness of CFRPs with...[21] Interlaminar Fracture Toughness of...[22] On the interlaminar fracture toughness of...[23] Mode I Fracture Toughness of Graphene...[24] Effect of nano-OMMTs on mode I and...[25] Enhancing Mode I and Mode II interlaminar fracture toughness of...[26] Effect of short multi-walled carbon nanotubes on the mode I ...[27] The Cork (a Cortiça). [28] Cork: properties, capabilities and...[29] Chemical composition and variability of...[30] Cork composites: a review. [31] New cork-based materials and... [32] Effects of fire temperature on the physical and chemical...[33] Influence of cork microparticles on...[34] Influence of the size and amount of cork particles...[35] Toughness of a brittle epoxy resin reinforced with...[36] Influence of microcork particles on the lap shear strength of...[37] Micro failure analysis of adhesively bonded joints enhanced with...[38] Effect of surface treatment in cork...[39] Effect of surface treatments on natural cork...[40] Calculating a damage parameter and bridging stress from...[41] Effect of interface fiber angle on...[42] Improvement of interlaminar fracture toughness in...

Copyright© 2020, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

بررسی آزمایشگاهی اثر میکرو الیاف‌های طبیعی بر چقرمگی شکست مود I چندلایه‌های کامپوزیتی با الیاف بافته شده

علی زین‌العابدین بیگی
گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
مظاهر سلامت طلب*
گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران.
امین فرخ آبادی
گروه مهندسی هوافضا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
حسن مسلمی نائینی
گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

چکیده
در مطالعه حاضر به بررسی اثر میکرو الیاف‌های طبیعی (ذرات کرک) بر چقرمگی شکست مود I چندلایه‌های کامپوزیتی با الیاف بافته شده پرداخته شده است. به همین منظور نمونه‌های تیر دو لبه یکسر گیردار (DCB) با استفاده از روش لایه چینی دستی و با چیدمان [۰]۲۸ ساخته شده‌اند. برای بررسی اثر ذرات میکرو کرک بر چقرمگی شکست، نمونه‌هایی با دو درصد وزنی مختلف (۱٪ وزنی و ۳٪ وزنی) ساخته شده و نتایج بدست آمده با نمونهٔ با رزین اپوکسی خالص مقایسه گردیده است. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که با افزایش مقدار ذرات کرک، مقدار چقرمگی بین‌لایه‌ای شروع تورق افزایش داشته است. مقدار بهبود چقرمگی شکست شروع برای نمونهٔ DCB با ۱% و ۳% وزنی کرک به ترتیب ۶۷/۱۵ درصد و ۷۱/۹۶ درصد، موجب افزایش شده است که علت این امر به نقش کرک در ناحیه غنی از رزین در نوک ترک بر می‌گردد که مانع شروع تورق در این ناحیه شده است. بر خلاف چقرمگی شکست شروع، چقرمگی شکست رشد با اضافه کردن ذرات کرک به رزین کاهش یافته است. در حین رشد تورق از آنجائیکه این الیاف به دلیل تجمع و کلوخگی در فصل مشترک تورق موجب ایجاد نواحی تمرکز تنش می‌گردند، در نتیجه میکرو الیاف‌های کرک نتوانسته‌اند مقدار چقرمگی شکست رشد را افزایش داده و در بعضی موارد موجب کاهش اندک چقرمگی شکست رشد تورق شده است. همچنین به منظور بررسی مکانیزم‌های آسیب، از سطوح شکست نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی عکسبرداری شده است.

کلیدواژه‌ها: ذرات میکرو کرک، مود I شکست، تیر دو لبه یکسر گیردار، تورق، چندلایه های کامپوزیتی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۲۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۰۳
*نویسنده مسئول: m.salamattalab@gmail.com

۱- مقدمه
کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف به دلیل نسبت استحکام به وزن بالا، سفتی بالا و عملکرد مناسب، کاربرد وسیعی در صنایعی نظیر خودرو، انرژی تجدیدپذیر، هوافضا و غیره دارند. یکی از خطرهای اصلی استفاده از این مواد، ضعف کامپوزیت‌های چندلایه در جهت ضخامت است که منجر به تورق در آن می‌شود. این پدیده می‌تواند بر اثر بارگذاری استاتیکی و دینامیکی رخ دهد و سبب از دست رفتن قابل توجهی از خواص مکانیکی شود. روش‌های مختلفی مانند دوختن (stitching)، لایه نشانی کردن، الیاف Z-Pin و اصلاح زمینه برای بهبود خواص خارج از صفحهٔ کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف استفاده می‌شود. رومهانی و زبنی[1] به منظور اصلاح زمینه کامپوزیت‌های الیاف کربن/اپوکسی تک جهته از نانو لوله‌های کربنی چند جداره (MWCNT) با درصدهای وزنی مختلف استفاده کردند. در این مطالعه نانو لوله با رزین مخلوط شده و چقرمگی شکست بین لایه‌ای مود I چندلایه‌ها به وسیلهٔ آزمایش تیر دولبه یک سر گیردار (Double Cantilever Beam) بر اساس استاندارد ASTM D5528 مشخصه سازی شد. بیشترین افزایش چقرمگی شکست ۱۳% و مربوط به ۳% وزنی افزودن نانولوله کربنی می‌باشد. گدارا و همکاران[2] با استفاده از نانو لوله‌های کربنی (CNT) مختلف شامل نانو لوله‌های کربنی عامل‌دار (functionalized) و غیر عامل‌دار (non-functionalized)، به ساخت چندلایه‌های کامپوزیتی کربن/اپوکسی با الیاف تک جهته پرداختند. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که افزایش قابل توجهی در چقرمگی شکست بین لایه‌ای مود I در نمونه‌های با زمینه اصلاح شده به وسیلهٔ نانولوله‌های کربنی چند جداره عامل‌دار بدست می‌آید. وجود نانولوله‌های کربنی دوجداره (DWCNT) در چندلایه‌های کامپوزیتی تقویت شده با الیاف شیشه، باعث کاهش چقرمگی شکست مود I تا حدود ۱۱% گردید[3]. سیهان و همکاران[4] از طریق روش قالب گیری به کمک خلا به ساخت چندلایه‌های کامپوزیتی شیشه/پلی استر با نانو لوله‌های کربنی غیرمنقطع پرداختند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که چقرمگی شکست شروع در مود I تغییری نکرده است و چقرمگی شکست رشد با ۰/۱ درصد وزنی ذرات نانو ۴۹% کاهش داشته است. آن‌ها نتیجه گرفتند که وجود نانو لوله‌های کربنی سبب کاهش تداخل الیاف (degree of fiber nesting) می‌شود. روند مشابهی در چقرمگی شکست رشد چندلایه‌های ساخته شده از الیاف شیشه/اپوکسی با استفاده از زمینه اصلاح شده با نانو لوله‌های کربنی چند جداره حاصل گردید. همچنین، مقدار نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی شروع در مقایسه با چندلایه‌های با اپوکسی خالص حدود ۲۵% افزایش داشته است[5]. کرمان ساروی و همکاران[6] اثر نانولوله‌های کربنی بر چقرمگی شکست مود I و کشش کامپوزیت شیشه/اپوکسی را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان می‌دهد که بیشترین تغییر انرژی و بار، در نانوکامپوزیت ۰/۵ درصد وزنی مشاهده می‌شود که نسبت به کامپوزیت خالص به ترتیب ۲۴/۱۵ و ۲۴/۴ درصد افزایش یافته است. علاوه بر مطالب ذکر شده، بسیاری از مطالعات بر بهبود چقرمگی شکست شروع و رشد با استفاده از اصلاح زمینه با نانو لوله‌های کربنی متمرکز شده‌اند[7-12]. علاوه بر اصلاح زمینه با نانو لوله‌های کربنی، سایر نانو ذرات مانند نانو سیلیکا، نانو الیاف کربن (CNF)، نانو رس و نانو لاستیک برای بهبود چقرمگی شکست چندلایه‌های کامپوزیتی استفاده می‌شود. بررسی‌های آزمایشگاهی بر روی چندلایه‌های کامپوزیتی

کربن/اپوکسی با زمینه اصلاح شده با نانو رس، افزایش قابل توجهی در چقرمگی شکست مود I را نشان می‌دهد[13]. بررسی آزمایشگاهی در مورد اثر نانو الیاف کربن cup-stacked بر چقرمگی شکست مود I چندلایه‌های کربن/اپوکسی نشان می‌دهد که پوست کندن و بیرون کشیدن ذرات نانو نسبتا چقرمگی شکست را افزایش می‌دهد[14]. موحدی آلنی و همکاران[15] به بررسی اثر نانو ذرات سیلیکا بر چقرمگی شکست مود II در نانو کامپوزیت شیشه/اپوکسی با الیاف بافته شده پرداختند. نتایج حاکی از آن است که اضافه کردن ۰/۵ درصد نانوسیلیکا در زمینهٔ نمونه‌ها، مقدار چقرمگی شکست را نسبت به نمونه‌های کامپوزیتی خالص تا ۳۶٪ بهبود می‌دهد. اثر نانو سیلیکا، نانو رس و ترکیب این دو ذره با درصد وزنی مختلف (تا ۱۲%) بر چقرمگی شکست کامپوزیت‌های کربن/اپوکسی توسط زنگ و همکاران به صورت آزمایشگاهی بررسی شده است[16]. نتایج آزمایشگاهی آن‌ها ثابت می‌کند که نانو لاستیک به دلیل حفره به خصوص ذرات لاستیک در ناحیه نزدیک به الیاف کربن و جدایش بین الیاف و زمینه لاستیک/اپوکسی بر چقرمگی شکست تاثیر به سزایی دارد. علاوه بر این، بهبود چقرمگی شکست چندلایه‌های شیشه/اپوکسی با نانو سیلیکا، نانو لاستیک و نانو کامپوزیت‌های ترکیب آن‌ها توسط تسای و همکاران انجام شده است[17]. همچنین بهبود چقرمگی شکست چندلایه‌های کربن/اپوکسی با زمینه اصلاح شده با نانو لاستیک توسط ازدمیر و همکاران گزارش شده است[18]. افزایش متوسط چقرمگی شکست چندلایه‌های کربن/اپوکسی تک جهته و شبه ایزوتروپیک با زمینه اصلاح شده با نانو لوله‌های کربنی به دلیل تمرکز تنش ناشی از نانو لوله‌های کربنی توسط پالمری و همکاران بررسی شده است[19]. تسانتزالیت و همکاران[20] و کوستوپولوس و همکاران[21] تاثیر نانو لوله‌های کربنی و تیتانات زیرکونات پیزوالکتریک (Piezoelectric Zirconate Titanate) را بر روی چقرمگی شکست بین لایه‌ای چند لایه‌های پلیمری تقویت شده با الیاف کربن بررسی کرده‌اند و نشان دادند که ترکیب PZT در زمینه به دلیل حالت ترد ذرات نانو، چقرمگی شکست را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که محتوای بالای نانو الیاف کربن و ترکیبی از PZT/CNF ۱٪ از CNF و ۴% از PZT) می‌تواند چقرمگی شکست بین لایه‌ای را افزایش دهد. کوستاگیاناکوپولو و همکاران[22] از نانوگرافن در زمینه اپوکسی استفاده کردند و چندلایه‌های تک جهته کربن/اپوکسی ساختند. آن‌ها با انجام آزمایش مود I شکست گزارش کردند که چقرمگی شکست شروع در مقایسه با چندلایه‌های بدون نانو ذرات تغییر چندانی نکرده است. هر و همکاران[23] با اضافه کردن نانو صفحه‌های گرافن به اپوکسی، مدول الاستیک و چقرمگی شکست مود I را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که با افزودن ۱ درصد وزنی نانو صفحهٔ گرافن، مدول الاستیک و چقرمگی شکست مود I به ترتیب ۴۲/۲٪ و ۳۲/۶٪ افزایش می‌یابد. چن و همکاران[24] اثر نانو ارگانیک مونتموریلونیتس (Nano-organic montmorillonites) را بر چقرمگی شکست مود I و II کامپوزیت‌های آمونیوم پلی فسفات پلی پروپیلن تقویت شده با الیاف شیشه پیوسته (CGF/PP/APP) بررسی کردند. نتایج حاکی از آن است که با افزودن نانو ارگانیک مونتموریلونیتس، چقرمگی شکست شروع و رشد مود I و چقرمگی شکست شروع مود II افزایش می‌یابد. پراساد و همکاران[25] با استفاده از نمونه‌های DCB و ENF به بررسی اثر نانو تیتانیوم دی اکسید بر چقرمگی شکست بین لایه‌ای مود I و II در کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کتان پرداختند. نتایج بیانگر بهبود چقرمگی شکست بین لایه‌ای با اضافه کردن ذرات نانو می‌باشد. ترونگ و همکاران[26] اثر نانو لوله‌های کربنی چند جداره کوتاه را بر چقرمگی شکست کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف کربن بافته شده (CFRP) را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که با افزودن نانولوله‌های کربنی به میزان ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد، چقرمگی شکست مود I به ترتیب ۱/۶، ۳۱ و ۳۱/۷ درصد افزایش می‌یابد. کرک (Cork) دارای خواص منحصر بفردی می‌باشد و با کاربردهای مختلف به کار می‌رود نظیر اتومبیل‌ها، هواپیماها، عایق صوتی، ارتعاشات و غیره[27-32]. امروزه مشخصه سازی خواص کرک توجه بسیاری از تحقیقات را به خود جلب نموده است. اثر ذرات کرک بر روی خواص مکانیکی چسب‌ها و اتصالات چسبی نظیر استحکام شبه استاتیکی و عمر خستگی توسط محققان بررسی شده است. نتایج آن‌ها نشان داد که ذرات کرک پتانسیل قابل توجهی برای تقویت اتصالات چسبی دارد[33-37]. خواص کامپوزیت چسب/کرک نه تنها به خصوصیات مواد بستگی دارد بلکه به خاصیت چسبندگی سطح بین کرک و رزین، اندازه و مقدار ذرات کرک و همچنین شرایط مخلوط شدن بستگی دارد[38]. فصل مشترک بین ذرات کرک و رزین از اهمیت زیادی برخوردار است زیرا تضمین کننده انتقال بارها بین ذرات و زمینه می‌باشد[39]. ذرات کرک ذاتا متخلخل و دارای سلول‌های باز هستند که می‌توانند توسط رزین اپوکسی پر شوند.

بر اساس مطالبی که در بالا بیان شد، بسیاری از پژوهشگران از مواد نانو به منظور بهبود چقرمگی شکست استفاده کرده‌اند؛ همچنین استفاده از ذرات میکرو کرک نیز به منظور بهبود خواص مکانیکی نظیر سفتی، استحکام و چقرمگی شکست چسب‌ها و اتصالات چسبی به کار رفته است و بر اساس یافته‌ها و مطالعات محققان حاضر، مطالعه جامعی در ارتباط با تاثیر این ماده بر چقرمگی شکست چندلایه‌های کامپوزیتی انجام نشده است لذا در مطالعه حاضر، به بررسی آزمایشگاهی اثر ذرات کرک بر چقرمگی شکست مود I چندلایه‌های کامپوزیتی با الیاف شیشه بافته شده پرداخته شده است. به همین منظور ذرات کرک با دو درصد وزنی مختلف (۱٪ وزنی و ۳٪ وزنی) به رزین اپوکسی اضافه و مخلوط شده و برای ۴ لایهٔ نزدیک به فصل مشترک تورق از رزین تقویت شده با الیاف کرک استفاده شده است تا اثر این ذرات بر چقرمگی شکست به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گیرد. در پایان به منظور بررسی مکانیزم‌های آسیب، از سطوح شکست تصاویر ماکرو و میکرو تهیه و به تحلیل آن‌ها پرداخته شده است.

۲- مواد و ساخت نمونه‌ها

چندلایه‌های کامپوزیتی به روش لایه چینی دستی (Hand lay-up) و با استفاده از ۲۸ لایه الیاف شیشه بافته شده، از شرکت AMP Composite ساخته شده‌اند. رزینی که برای ساخت این نمونه‌ها

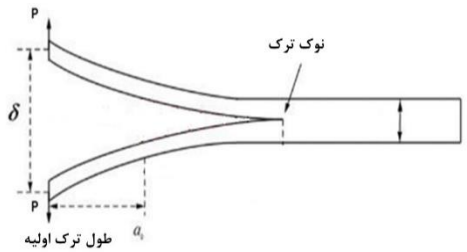
استفاده شده است، رزین EPL 1012 به همراه سخت کنندهٔ RH 112 (Hardener) می‌باشد که با نسبت وزنی ۱۰۰ به ۱۵، مخلوط شده‌اند و مشخصات هندسی نمونه‌های ساخته شده در جدول ۱ قابل رویت است.

همچنین تامین کننده ذرات کرک Amorim Cork Composites (Mozelos, Portugal) می‌باشد. به منظور آماده سازی نمونه‌ها ذرات کرک با دو درصد وزنی مختلف (۱٪ وزنی و ۳٪ وزنی) به رزین اضافه شده و توسط همزن مکانیکی با سرعت ۲۰۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۳۰ دقیقه هم زده شده است تا ذرات کرک بطور یکنواخت داخل رزین پخش شود. برای ایجاد پیش ترک، نوار تفلون با ضخامت ۱۳ میکرون به کار گرفته شده است. به منظور بررسی اثر ذرات میکرو کرک بر چقرمگی شکست مودI چندلایه‌های کامپوزیتی، رزین تقویت شده با این ذرات برای ۴ لایه نزدیک به فصل مشترک تورق استفاده شده است. برای پخت اولیه، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط و پس از آن به منظور فراپخت، به مدت ۴ ساعت در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد قرار داده شدند. سپس نمونه‌های DCB به عرض ۲۵ میلیمتر و طول ۱۴۰ میلیمتر برش داده شدند. در پایان با هدف دیده شدن رشد ترک در طول تست شکست، لبهٔ نمونه های DCB سنباده زده شد که شماتیک آن در شکل ۱ نشان داده شده است.

به منظور مشخصه سازی خواص مکانیکی چندلایه‌های کامپوزیتی، از استاندارد ASTM D3039 برای کشش، ASTM D3518 برای برش داخل صفحه‌ای و از ASTM D790 برای خمش استفاده شده است (جدول ۲).

جدول ۱) مشخصات هندسی چند لایه‌های کامپوزیتی

مشخصه هندسی	مقدار
عرض نمونه (میلیمتر) ($\pm SDV$)	24.96 ±0.05
ضخامت نمونه (میلیمتر) ($\pm SDV$)	5.01 ±0.02



شکل ۱) شماتیک نمونهٔ تیر دو لبه یکسر گیردار

جدول ۲) خواص مکانیکی چندلایه‌های کامپوزیتی

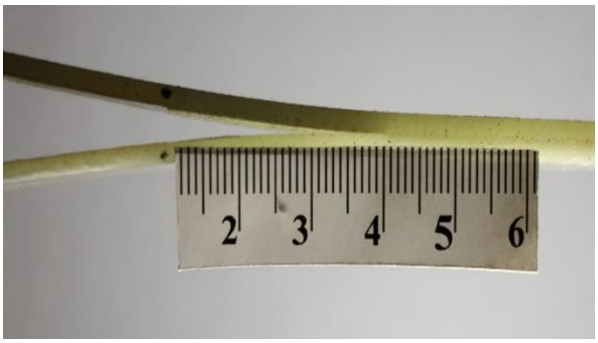
خواص مکانیکی	مقدار
مدول الاستیک طولی (E_1)	۱۹/۵ گیگاپاسکال
مدول الاستیک عرضی (E_2)	۱۹/۵ گیگاپاسکال
مدول برشی داخل صفحه‌ای (G_{12})	۳/۱ گیگاپاسکال
مدول خمشی (E_b)	۱۸ گیگاپاسکال
ضریب پواسون (ν_{12})	۰/۲۹

۲-۱- انجام تست چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای مود I

برای استخراج منحنی مقاومت (Resistance curve) نیاز است تا سه پارامتر بار، جابه جایی و طول ترک به صورت همزمان در طول شروع و رشد ترک، ثبت شود. به منظور انجام تست‌های شکست از دستگاه سنتام (STM-150) به همراه لودسل با دقت بالای Bongshin به ظرفیت ۵۰ کیلوگرم نیرو استفاده شده است. نرخ جابه جایی برای تست کشش، ۱ میلیمتر بر دقیقه می‌باشد. در شکل ۲، چیدمان و تجهیزات مورد نیاز جهت انجام تست چقرمگی شکست بین لایه‌ای مود I نشان داده شده است. جهت تکرار پذیری، از هر نمونهٔ مختلف، تست شکست حداقل بر روی سه نمونه انجام می‌شود (شکل ۳). برای ثبت تصاویر ماکروِ مربوط به رشد و انتشار ترک، دوربین کانن d80 به کار رفته است که در تصاویر گرفته شده در حین شکست بوسیلهٔ آن، تقریباً در هر میلیمتر ۱۰۵ پیکسل وجود دارد.

بر اساس استاندارد ASTM D5528 سه روش برای محاسبه چقرمگی شکست بین لایه‌ای وجود دارد. روش تئوری تیر اصلاح شده (Modified Beam Theory)، روش کالیبراسیون نرمی (Compliance Calibration) و روش کالیبراسیون نرمی اصلاح شده (Modified Compliance Calibration) که روش تئوری تیر اصلاح شده، مقادیر چقرمگی شکست را به صورت محافظه کارانه ارائه می نماید. روش تئوری تیر اصلاح شده یکی از روش‌های رایج برای مشخصه سازی چقرمگی شکست نمونه‌های DCB می‌باشد. برانر و همکاران[40] چقرمگی شکست نمونه های DCB تک جهته و چندجهته زیادی را با استفاده از روش تئوری تیر اصلاح شده

شکل ۲) چیدمان انجام تست چقرمگی شکست بین لایه‌ای مود I



شکل ۳) نمونه کامپوزیتی تیر دو لبه یکسر گیردار تحت بارگذاری مود I

محاسبه کردند. آنها نشان دادند که پارامتر اصلاحی طول ترک از نمونه‌ای به نمونهٔ دیگر متغیر است. این رفتار در شکل ۴ و ۵ که از داده‌های آزمایشگاهی بدست آمده، نشان داده شده است. علاوه بر این، شکریه و همکاران[41] نشان دادند که نتایج بدست آمده برای مجاسبه چقرمگی شکست شروع در روش تئوری تیر اصلاح شده، محافظه کارانه‌تر از روش کالیبراسیون نرمی می‌باشد. آن‌ها همچنین نشان دادند که مقدار چقرمگی شکست رشد بدست آمده از روش کالیبراسیون نرمی کمی کمتر از مقدار بدست آمده از روش تئوری تیر اصلاح شده می‌باشد اگرچه رفتار منحنی مقاومت برای هر دو روش داده کاهی، یکسان است. همچنین به منظور تعیین نقطه شروع تورق، نقطه غیر خطی شدن در نمودار بار-جابه‌جایی درنظر گرفته شده است. بر اساس روش داده‌کاهی تئوری تیر اصلاح شده، چقرمگی شکست برای هر طول ترک از رابطهٔ ۱ محاسبه می‌گردد که در آن P بار وارد شده، δ جابه‌جایی، a طول ترک، b عرض نمونه و Δ پارامتر اصلاحی طول ترک می‌باشد. برای بدست آوردن مقدار Δ می‌بایست نمودار ریشه سوم نرمی بر حسب طول ترک را رسم نمود.

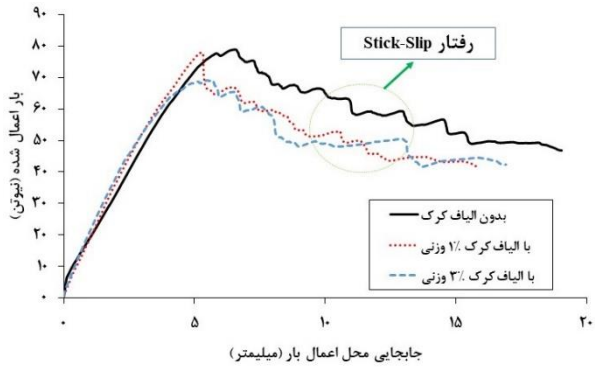
$$G_I = \frac{3P\delta}{2b(a+|\Delta|)} \quad (1)$$

۳- نتایج آزمایشگاهی

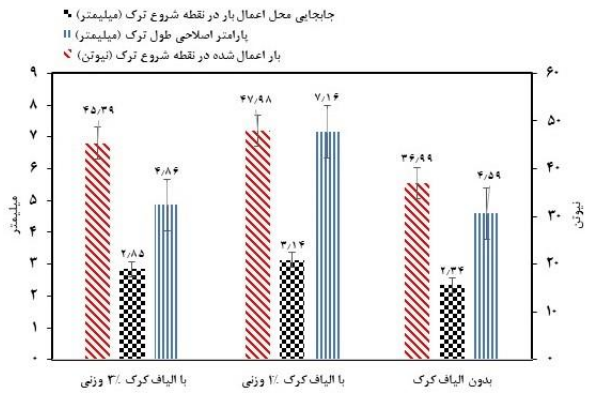
در این بخش به بررسی و تحلیل نتایج آزمایشگاهی نمونه‌های DCB پرداخته خواهد شد. در شکل ۴ نمودار بار-جابه‌جایی برای نمونه‌های کامپوزیتی نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۴ مشخص است، رفتار نمودار بار-جابه‌جایی در ابتدا به صورت خطی می‌باشد اما پس از مدتی رفتار نمودار بار-جابه‌جایی از حالت خطی خارج شده و رفتار غیرخطی از خود نشان می‌دهد؛ در واقع غیرخطی شدن نمودار بدین معنی می‌باشد که رشد ترک آغاز شده است که در منحنی مقاومت نشان دهندهٔ چقرمگی شکست شروع (Initiation fracture toughness) می‌باشد. پس از ناحیه غیر خطی در نمودار بار-جابه‌جایی، مقدار بار همچنان در حال افزایش است تا به ماکزیمم مقدار خود برسد و سپس بعد از آن مقدار بار حالت کاهشی پیدا می‌کند؛ زمانیکه بار به ماکزیمم مقدار خود می‌رسد در حقیقت چقرمگی شکست حول یک مقدار خاص شروع به نوسان می‌کند که اصطلاحاً به آن چقرمگی شکست رشد (Propagation fracture toughness) گفته می‌شود. نمونه‌های DCB بدون الیاف کرک دارای ماکزیمم بار بیشتری نسبت به نمونه‌های با الیاف ۱% و ۳% درصد وزنی هستند و با افزایش درصد وزنی ذرات میکرو کرک، ماکزیمم بار کاهش یافته است. در پژوهش حاضر، الیاف‌های شیشه در چندلایه‌های کامپوزیتی با الیاف بافته شده بصورت عرضی و طولی (Plain) قرار دارند. رشد ترک در نمونه‌های یاد شده، بیشتر در فصل مشترک الیاف و رزین رخ می‌دهد (Adhesive failure). بعد از رشد ترک در راستای طولی الیاف، الیاف‌های عرضی در مقابل رشد ترک مقاومت می‌کنند و به همین دلیل مقدار بار حالت افزایشی پیدا می‌نماید؛ سپس با رشد ترک در راستای طولی الیاف، افت بار مشاهده می‌گردد. همانطور که در شکل ۴ مشخص است، با افزایش درصد وزنی کرک، رفتار Stick-Slip بیشتر رخ می‌دهد زیرا الیاف‌های کرک نیز مانع از رشد ترک می‌شوند. مقادیر میانگین بار در نقطه غیرخطی شدن، جابه جایی در آن نقطه و پارامتر اصلاحی طول ترک در شکل ۵ نشان داده است.

۳-۱- چقرمگی شکست

در شکل ٦ نمودار ریشهٔ سوم نرمی بر حسب طول ترک برای نمونه‌های DCB مختلف آورده شده است. شکل ۷ نشان دهندهٔ مقادیر طول ناحیه پل زنی الیاف، چقرمگی شکست شروع و رشد می‌باشد؛ همانطور که در این نمودار مشخص است با افزایش مقدار ذرات کرک، شروع رشد ترک به انرژی بیشتری نیاز دارد. بیشترین مقدار بهبود چقرمگی شکست شروع برای نمونهٔ DCB با الیاف کرک ۳% وزنی است که به مقدار ۷۱/۹٦% افزایش یافته است. در نمونهٔ با الیاف کرک ۱% وزنی نیز مقدار ٦۷/۱۵% بهبود در چقرمگی شکست شروع مشاهده شد؛ علت این امر نقش بیشتر رزین در ناحیه نوک ترک (Crack tip) است و کرک موجود در رزین نیز در مقابل رشد ترک مقاومت می‌کند. به عبارت دیگر با افزایش درصد



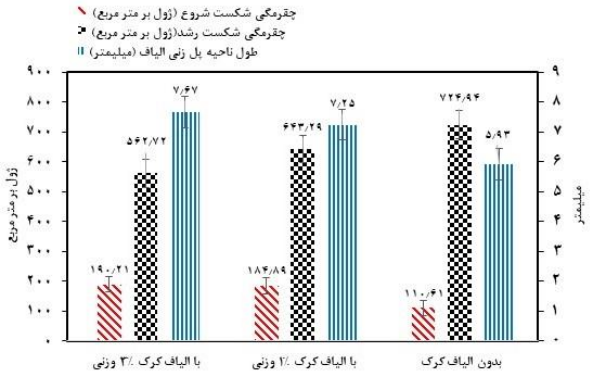
شکل ۴) مقایسه نمودارهای بار-جابه‌جایی نمونه‌های DCB با درصدهای وزنی مختلف



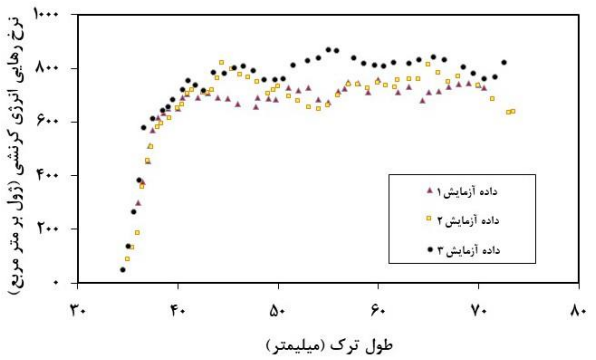
شکل ۵) مقادیر میانگین بار در نقطه غیرخطی شدن، جابه جایی در آن نقطه و پارامتر اصلاحی طول ترک

وزنی کرک در رزین، احتمال برخورد میکرو ترک‌ها در نوک اولیه ترک (ناحیه غنی از رزین) به میکرو الیاف‌های کرک بیشتر بوده و موجب انحراف میکرو ترک‌ها و جذب بیشتر انرژی در این ناحیه می‌گردد. منحنی مقاومت هر یک از نمونه‌ها نیز در شکل ۸ نشان داده شده است.

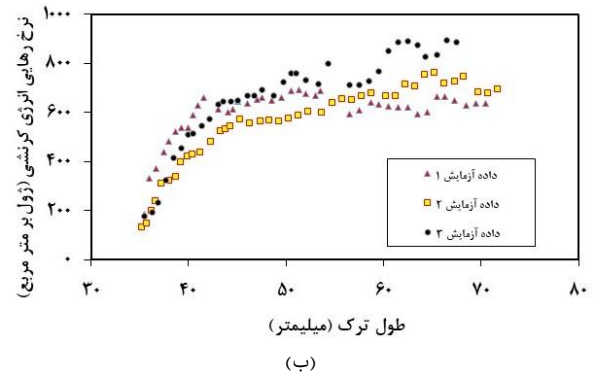
نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که بر خلاف چقرمگی شکست شروع، چقرمگی شکست رشد با اضافه کردن ذرات کرک به رزین کاهش یافته است. علت این امر به این موضوع بر می‌گردد که اگر چه رشد ترک بعد از برخورد به ذرات کرک متوقف می‌شود اما از طرفی ذرات کرک به دلیل کلوخگی و تجمیع در بعض از موارد می‌توانند نقش نقاط تمرکز تنش در فصل مشترک تورق را بازی نمایند، لذا همین موضوع سبب می‌شود تا افزایش مقدار بار نسبت به نمونه‌های بدون میکرو الیاف چندان بالا نباشد؛ همچنین کرک‌ها به دلیل طول کوتاه خود نقش چندانی در پل زنی بین دو سطح بالا و پایین تورق بازی نمی‌کنند.



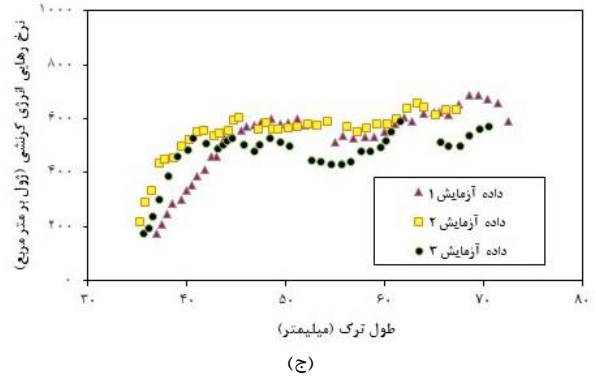
شکل ۷) مقایسه طول ناحیه پل زنی الیاف، چقرمگی شکست شروع و رشد برای نمونه‌های مختلف



(الف)

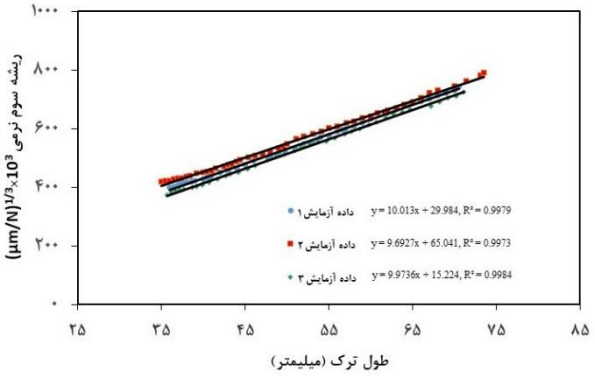


(ب)

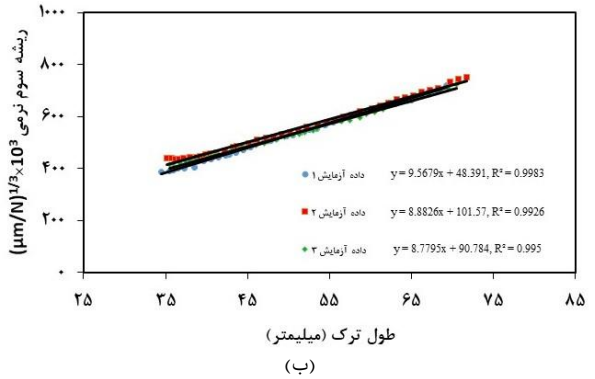


(ج)

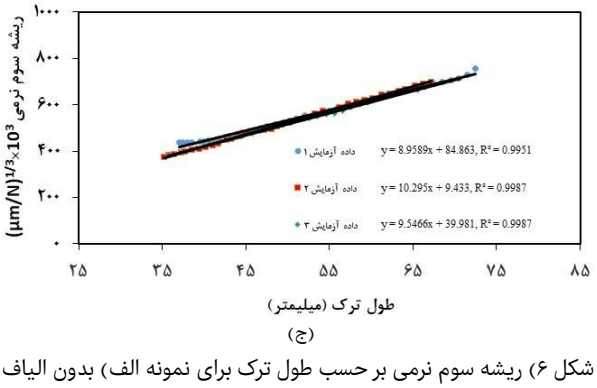
شکل ۸) منحنی مقاومت برای نمونه های DCB الف) بدون الیاف کرک ب) با الیاف کرک ۱% وزنی ج) با الیاف کرک ۳% وزنی



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۶) ریشه سوم نرمی بر حسب طول ترک برای نمونه الف) بدون الیاف کرک ب) با الیاف کرک ۱% وزنی ج) با الیاف کرک ۳% وزنی

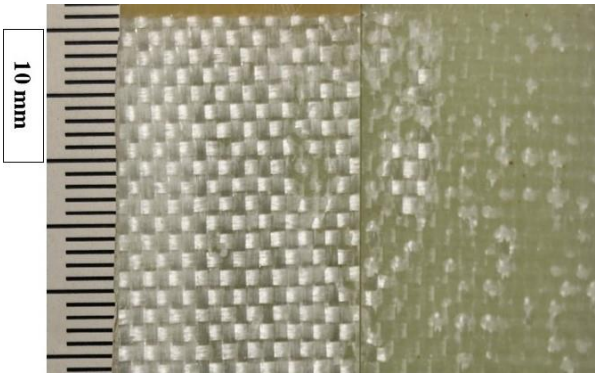
از طرفی نیز شکست نیز در مود بازشدگی (Opening) اتفاق می‌افتد و به دلیل بالا بودن استحکام ذرات کرک، میکروترک‌ها ترجیح می‌دهند که اتصال بین کرک و رزین را بشکنند و ترک بعد از برخورد به آن، باعث شکسته شدن کرک نمی‌شود بلکه آن را دور می‌زند و اتصال کرک با رزین را جدا می‌کند و در حقیقت اتصال رزین با الیاف مستحکم‌تر از اتصال رزین با کرک می‌باشد. بر اساس اطلاعات محققین حاضر تاکنون میکرو الیاف کرک برای تقویت چقرمگی شکست بین لایه‌ای مود I چندلایه‌های کامپوزیتی به کار نرفته است اما برخی از محققین، نانولوله‌های کربنی و مواد مشابه را به منظور افزایش چقرمگی شکست بین لایه‌ای به کار برده‌اند. ژنگ و همکاران[42] از CNTs/PSF برای تقویت چقرمگی شکست بین لایه‌ای CFRPs استفاده کردند و در کار آن‌ها مقدار چقرمگی شکست مود I و مود II به ترتیب ۵۳٪ و ۳٤٪ افزایش یافت. همچنین وانگ و همکاران[14] نشان دادند که افزودن ۰/۵ درصد وزنی نانو الیاف کربن cup-stacked به چندلایه‌های کامپوزیتی کربن اپوکسی باعث بهبود چقرمگی شکست مود I تا مقدار ۱۳/٦٪ می گردد.

۳-۲- مورفولوژی

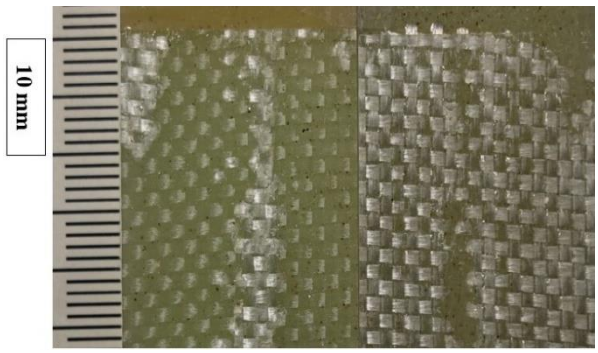
به منظور درک بهتر مکانیزم‌های شروع و رشد ترک نمونه‌های کامپوزیتی تیر دو لبه یکسر گیردار، از سطوح شکست آن‌ها تصاویر میکرو و ماکرو تهیه شده است. با بررسی تصاویر ماکرو (شکل ۹) مشخص می‌گردد که مکانیزم اصلی رشد ترک در نمونهٔ بدون الیاف کرک، رشد ترک در فصل مشترک رزین و الیاف است که این مورد در نمونه‌های با الیاف کرک همراه با سایر مکانیزم‌های آسیب رخ داده است. در شکل ۹-ب و ۹-ج تجمع الیاف کرک نشان داده شده است که سبب افزایش مقدار چقرمگی شکست شروع می‌گردد. در شکل ۱۰ تصاویر SEM سطوح شکست نمونه‌ها نشان داده است. ساختار سلولی الیاف کرک بیانگر این موضوع است که الیاف از رزین بیرون مانده و شکسته نشده است و می توان گفت مکانیزم اصلی رشد تورق در حین برخورد با الیاف کرک، ایجاد آسیب در اتصال بین میکرو الیاف کرک و رزین بوده و سپس بیرون کشیده شدن (Pull out) میکرو الیاف از رزین می باشد؛ همچنین با بررسی تصویر بدست آمده از میکروسکوپ الکترون روبشی مشخص می‌گردد که مکانیزم‌های آسیبِ اثر به جا مانده از الیاف (که در آن اتصال الیاف شیشه و ماتریس جدا شده است) و شکست الیاف در فصل مشترک تورق به وقوع پیوسته است.

۴- نتیجه گیری

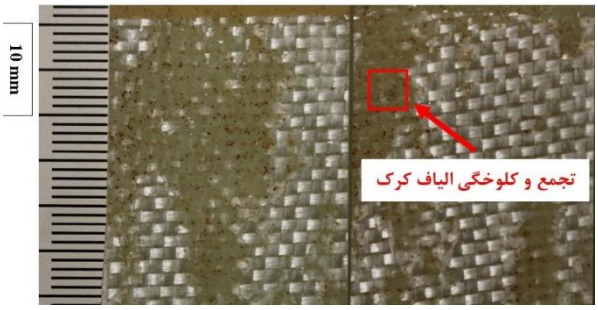
با توجه به اینکه تا کنون مطالعهٔ جامعی در ارتباط با تاثیر ذرات میکرو الیاف کرک بر چقرمگی شکست مود I چندلایه‌های کامپوزیتی انجام نشده است هدف از مطالعه حاضر، بررسی اثر این ماده بر چقرمگی شکست مود I چندلایه‌های کامپوزیتی ساخته شده با الیاف بافته شده ساده می‌باشد. به همین منظور ذرات کرک



(الف)

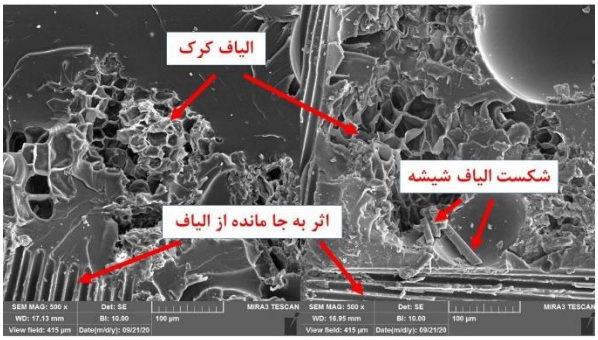


(ب)



(ج)

شکل ۹) سطوح شکست نمونه‌های DCB الف) بدون کرک ب) ۱% وزنی کرک ج) ۳% وزنی کرک



شکل۱۰) تصویر SEM سطوح شکست نمونه‌های DCB با ۳% وزنی کرک

با دو درصد وزنی مختلف (۱٪ وزنی و ۳٪ وزنی) به رزین اپوکسی اضافه گردید و برای ۴ لایهٔ نزدیک فصل مشترک تورق از رزین تقویت شده با میکرو الیاف کرک استفاده شده است. آنگاه تست شکست نمونه‌های DCB بر اساس استاندارد ASTM D5528 انجام شده و مقادیر چقرمگی شکست شروع و رشد با استفاده از روش

داده‌کاوی تئوری تیر اصلاح شده (MBT) استخراج شده‌اند. نتایج آزمایشگاهی نشان دادند که افزودن ذرات کرک به میزان ۳% وزنی به رزین سبب افزایش ۷۱/۹۶% چقرمگی شکست شروع می‌شود؛ علت این امر به نقش کرک در ناحیه غنی از رزین در نوک ترک بر می‌گردد که مانع شروع تورق در این ناحیه شده است. بر خلاف چقرمگی شکست شروع، چقرمگی شکست رشد با اضافه کردن ذرات کرک به رزین کاهش یافته است. در حین رشد تورق از آنجائیکه این الیاف به دلیل تجمع و کلوخگی در فصل مشترک تورق موجب ایجاد نواحی تمرکز تنش می‌گردند، در نتیجه میکرو الیاف‌های کرک نتوانسته‌اند مقدار چقرمگی شکست رشد را افزایش داده و در بعض موارد موجب کاهش اندک چقرمگی شکست رشد تورق شده است. همچنین به منظور بررسی مکانیزم‌های آسیب، از سطوح شکست نمونه‌ها تصاویر میکرو و ماکرو تهیه شده است. تصاویر ماکرو نشان می‌دهد که مکانیزم اصلی رشد ترک در نمونهٔ بدون الیاف کرک، رشد ترک در فصل مشترک رزین و الیاف شیشه است. همچنین با بررسی تصاویر SEM مشخص می‌گردد که با اضافه کردن الیاف کرک به فصل مشترک تورق، سایر مکانیزم‌های آسیب نظیر اثر به جا مانده از الیاف و شکست الیاف شیشه رخ داده است.

تشکر و قدردانی: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

تاییدیه اخلاقی: نتایج علمی بیان شده حاصل فعالیت‌های پژوهشگران مقاله بوده و تا کنون در مجله دیگری چاپ نگردیده است؛ همچنین صحت نتایج بر عهدهٔ نویسندگان مقاله می‌باشد.

تعارض منافع: نویسندگان مقاله اعلام می‌دارند که مقالهٔ حاضر هیچگونه تعارض منافعی با اشخاص و سازمان‌ها ندارد.

سهم نویسندگان: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

منابع مالی: تامین تمامی هزینه‌ها بصورت شخصی بوده است.

منابع

1- Romhany G, Szebenyi G. Interlaminar crack propagation in MWCNT/fiber reinforced hybrid composites. Express Polymer Letters. 2009; 3(3):145-51.

2- Godara A, Mezzo L, Luizi F, Warrier A, Lomov SV, Van Vuure AW, gorbatikh L, Moldenaers P, Verpoest I. Influence of carbon nanotube reinforcement on the processing and the mechanical behaviour of carbon fiber/epoxy composites. Carbon. 2009; 47(12):2914-23.

3- Wichmann MH, Sumfleth J, Gojny FH, Quaresimin M, Fiedler B, Schulte K. Glass-fibre-reinforced composites with enhanced mechanical and electrical properties–benefits and limitations of a nanoparticle modified matrix. Engineering Fracture Mechanics. 2006; 73(16):2346-59.

4- Seyhan AT, Tanoglu M, Schulte K. Mode I and mode II fracture toughness of E-glass non-crimp fabric/carbon nanotube (CNT) modified polymer based composites. Engineering Fracture Mechanics. 2008; 75(18):5151-62.

5- Warrier A, Godara A, Rochez O, Mezzo L, Luizi F, Gorbatikh L, et al. The effect of adding carbon nanotubes to glass/epoxy composites in the fibre sizing and/or the matrix. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2010; 41(4):532-8.

6- Kerman saravi M, Pol MH, Sattari MH. Experimental investigation of the influence of adding carbon nanotubes on the mode l interlaminar fracture toughness of laminated composites. Modares Mechanical Engineering. 2016; 16(3) (in Persian).

7- Ashrafi B, Guan J, Mirjalili V, Zhang Y, Chun L, Hubert P, et al. Enhancement of mechanical performance of epoxy/carbon fiber laminate composites using single-walled carbon nanotubes. Composites science and technology. 2011; 71(13):1569-78.

8- Garcia EJ, Wardle BL, Hart AJ, Yamamoto N. Fabrication and multifunctional properties of a hybrid laminate with aligned carbon nanotubes grown in situ. Composites Science and Technology. 2008; 68(9):2034-41.

9- Karapappas P, Vavouliotis A, Tsotra P, Kostopoulos V, Paipetis A. Enhanced fracture properties of carbon reinforced composites by the addition of multi-wall carbon nanotubes. Journal of Composite Materials. 2009; 43(9):977-85.

10- Sadeghian R, Gangireddy S, Minaie B, Hsiao K-T. Manufacturing carbon nanofibers toughened polyester/glass fiber composites using vacuum assisted resin transfer molding for enhancing the mode-I delamination resistance. Composites Part A: applied science and manufacturing. 2006; 37(10):1787-95.

11- Yokozeki T, Iwahori Y, Ishiwata S, Enomoto K. Mechanical properties of CFRP laminates manufactured from unidirectional prepregs using CSCNT-dispersed epoxy. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2007; 38(10):2121-30.

12- Yokozeki T, Iwahori Y, Ishibashi M, Yanagisawa T, Imai K, Arai M, et al. Fracture toughness improvement of CFRP laminates by dispersion of cup-stacked carbon nanotubes. Composites Science and Technology. 2009; 69(14):2268-73.

13- Siddiqui NA, Woo RS, Kim J-K, Leung CC, Munir A. Mode I interlaminar fracture behavior and mechanical properties of CFRPs with nanoclay-filled epoxy matrix. Composites Part A: Applied science and manufacturing. 2007; 38(2):449-60.

14- Wang P, Liu W, Zhang X, Lu X, Yang J. Enhanced fracture toughness of carbon fabric/epoxy laminates with pristine and functionalized stacked-cup carbon nanofibers. Engineering Fracture Mechanics. 2015; 148:73-81.

15- Movahhedi Aleni H, Lighat GH, Pol Mh, Afrouzian A. An experimental investigation on mode-II interlaminar fracture toughness of nanosilica modified glass/epoxy fiber-reinforced laminates. Modares Mechanical Engineering. 2015; 15(3):283-90 (in Persian).

16- Zeng Y, Liu H-Y, Mai Y-W, Du X-S. Improving interlaminar fracture toughness of carbon fibre/epoxy

characteristics of the ash from two plots of cork oak (Quercus suber). Land degradation & development. 2009; 20(6):589-608.
33- da Silva C, Barbosa A, Carbas R, Marques E, Akhavan-Safar A, da Silva L. Influence of cork microparticles on the fracture type in single lap joints. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 2020; 235(3):497-507.
34- Barbosa A, Da Silva L, Öchsner A, Abenojar J, Del Real J. Influence of the size and amount of cork particles on the impact toughness of a structural adhesive. The Journal of Adhesion. 2012; 88(4-6):452-70.
35- Barbosa AQ, Da Silva L, Abenojar J, Figueiredo M, Öchsner A. Toughness of a brittle epoxy resin reinforced with micro cork particles: Effect of size, amount and surface treatment. Composites Part B: Engineering. 2017; 114:299-310.
36- Akhavan-Safar A, Barbosa AQ, Ayatollahi MR, da Silva LFM. Influence of microcork particles on the lap shear strength of an epoxy adhesive subjected to fatigue loading and different environmental conditions. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications. 2020; 234(6):851-8.
37- Akhavan-Safar A, Barbosa AQ, da Silva LFM, Ayatollahi MR. Micro failure analysis of adhesively bonded joints enhanced with natural cork particles: Impact of overlap length and particles volume fraction. Frattura ed Integrità Strutturale. 2018; 12(46):266-74.
38- Abdallah FB, Cheikh RB, Baklouti M, Denchev Z, Cunha AM. Effect of surface treatment in cork reinforced composites. Journal of Polymer Research. 2010; 17(4):519-28.
39- Abenojar J, Barbosa A, Ballesteros Y, Del Real J, Da Silva L, Martínez M. Effect of surface treatments on natural cork: surface energy, adhesion, and acoustic insulation. Wood science and technology. 2014; 48(1):207-24.
40- Brunner A, Blackman B, Williams J. Calculating a damage parameter and bridging stress from GIC delamination tests on fibre composites. Composites Science and Technology. 2006; 66(6):785-95.
41- Shokrieh M, Salamat-Talab M, Heidari-Rarani M. Effect of interface fiber angle on the R-curve behavior of E-glass/epoxy DCB specimens. Theoretical and Applied Fracture Mechanics. 2016; 86:153-60.
42- Zheng N, Huang Y, Liu H-Y, Gao J, Mai Y-W. Improvement of interlaminar fracture toughness in carbon fiber/epoxy composites with carbon nanotubes/polysulfone interleaves. Composites Science and Technology. 2017;140:8-15.
laminates by incorporation of nanoparticles. Composites Part B: Engineering. 2012; 43(1):90-4.
17- Tsai J-L, Huang B-H, Cheng Y-L. Enhancing fracture toughness of glass/epoxy composites by using rubber particles together with silica nanoparticles. Journal of composite materials. 2009; 43(25):3107-23.
18- Ozdemir N, Zhang T, Aspin I, Scarpa F, Hadavinia H, Song Y. Toughening of carbon fibre reinforced polymer composites with rubber nanoparticles for advanced industrial applications. Express Polymer Letters. 2016; 10(5):394-407.
19- Palmeri M, Putz K, Ramanathan T, Brinson L. Multi-scale reinforcement of CFRPs using carbon nanofibers. Composites science and technology. 2011; 71(2):79-86.
20- Tsantzalis S, Karapappas P, Vavouliotis A, Tsotra P, Kostopoulos V, Tanimoto T, Friedrich K. On the improvement of toughness of CFRPs with resin doped with CNF and PZT particles. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2007; 38(4):1159-62.
21- Kostopoulos V, Karapappas P, Loutas T, Vavouliotis A, Paipetis A, Tsotra P. Interlaminar Fracture Toughness of Carbon Fibre-Reinforced Polymer Laminates With Nano-and Micro-Fillers. Strain. 2011; 47:e269-e82.
22- Kostagiannakopoulou C, Loutas T, Sotiriadis G, Markou A, Kostopoulos V. On the interlaminar fracture toughness of carbon fiber composites enhanced with graphene nano-species. Composites Science and Technology. 2015; 118:217-25.
23- Her S-C, Zhang K-C. Mode I Fracture Toughness of Graphene Reinforced Nanocomposite Film on Al Substrate. Nanomaterials. 2021; 11(7):1743.
24- Chen H, Wang J, Ni A, Ding A, Li S, Han X. Effect of nano-OMMTs on mode I and mode II fracture toughness of continuous glass fibre reinforced polypropylene composites. Composite Structures. 2019; 208:498-506.
25- Prasad V, Sekar K, Varghese S, Joseph M. Enhancing Mode I and Mode II interlaminar fracture toughness of flax fibre reinforced epoxy composites with nano TiO2. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2019; 124:105505.
26- Truong GT, Choi K-K. Effect of short multi-walled carbon nanotubes on the mode I fracture toughness of woven carbon fiber reinforced polymer composites. Construction and Building Materials. 2020; 259:119696.
27- Fortes A, Rosa M, Pereira H. The Cork (a Cortiça). IST Press, Lisboa; 2004.
28- Silva S, Sabino M, Fernandes E, Correlo V, Boesel L, Reis R. Cork: properties, capabilities and applications. International Materials Reviews. 2005; 50(6):345-65.
29- Pereira H. Chemical composition and variability of cork from Quercus suber L. Wood science and technology. 1988; 22(3):211-8.
30- Gil L. Cork composites: a review. Materials. 2009; 2(3):776-89.
31- Gil L. New cork-based materials and applications. Materials. 2015; 8(2):625-37.
32- Úbeda X, Pereira P, Outeiro L, Martin D. Effects of fire temperature on the physical and chemical