



یادداشت تحقیقاتی:

اثر زاویه قرارگیری الیاف بر روی چقرمگی شکست بین لایه‌ای در مود I ماده مرکب الیاف شیشه / اپوکسی

عبدالحسین فریدون¹، سیدعلیرضا ثابت²، شکوفه دولتی^{3*} و محمدرضا اسماعیلی⁴¹ استاد، دانشکده مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان² استادیار، دانشکده کامپوزیت، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، تهران³ کارشناسی ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سمنان، سمنان⁴ کارشناسی، دانشکده عمران، دانشگاه قم، قم

تاریخ دریافت: 1392/03/04؛ تاریخ بازنگری: 1392/07/16؛ تاریخ پذیرش: 1393/04/25

چکیده

در این مقاله، اثر زاویه قرارگیری الیاف بر روی چقرمگی شکست بین لایه‌ای در مود I ماده مرکب الیاف شیشه/ اپوکسی، به طور تجربی مورد بررسی قرار می‌گیرد. به عبارتی به بررسی نمونه‌ها در پدیده تورق و پدیده پل زنی در الیاف می‌پردازیم. بدین منظور از آزمون تیر یکسر گیردار دولبه با ترک اولیه یکسان برای همه نمونه‌ها استفاده می‌شود. بدین منظور نمونه‌های مورد نظر، با الیاف شیشه با بافت دو بعدی، که تاکنون انجام نشده است، با زاویه‌های قرارگیری زیر ساخته شد: $[90/0]_{4s}$ ، $[0/9]_{4s}$ ، $[\pm 45]_{4s}$. منحنی بار-جابجایی از آزمون به دست می‌آید و سپس با استفاده از روش تئوری کالیبره شده، منحنی R برای به دست آوردن چقرمگی شکست بین لایه‌ای استفاده می‌شود. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهند که تغییر زاویه قرارگیری الیاف از 0 به ± 45 و از ± 45 به 90 درجه باعث افزایش در چقرمگی شکست بین لایه‌ای می‌شود و پدیده پل زنی در الیاف را به تاخیر می‌اندازد.

کلمات کلیدی: چقرمگی شکست بین لایه‌ای در مود I؛ زاویه قرارگیری الیاف؛ تورق.

Technical Note:

The effect of stacking sequence on mode I fracture toughness of glass fiber/epoxy laminates

A. Fereidoon¹, A.R. Sabet², S.H. Dolati^{3*} and M.R. Esmaeeli⁴¹ Professor, Mech. Eng., Semnan University, Semnan, Iran² Assoc. Prof., Polymer. Eng., Iran Polymer and Petochemical Institute, Tehran, Iran³ M.Sc., Mech. Eng., Islamic Azad University, Semnan, Iran⁴ B.Sc., Civil Eng., Qom University, Qom, Iran

Abstract

In this paper, the effect of stacking sequence on mode I fracture toughness of glass fiber/epoxy laminates is experimentally investigated. In other hands, the interlaminar fracture toughness and fiber bridging is studied. so the double cantilever beam (DCB) test with the all od the same angles is used. Thus, samples with woven glass fiber (WR), which has been done so far, with angles was made: $[90/45]_{4s}$, $[0/90]_{4s}$ and $[\pm 45]_{4s}$. The load-displacement curve is obtained and with the compliance calibration (CC) method, R-curve to obtain interlaminar fracture toughness can be used. The results showed with the angle changing of 0 to ± 45 and of ± 45 to 90 interlaminar fracture toughness increased and fiber bridging delays..

Keywords: Mode I fracture toughness; Stacking sequence; Interlaminar.

* نویسنده مسئول؛ تلفن: 09126730758

آدرس پست الکترونیک: shokoofeh.dolati2008@gmail.com

1- مقدمه

تورق¹، یکی از مکانیزم‌های شکست در مواد مرکب تقویت شده با الیاف است. برخی از مواردی که تورق در کامپوزیت‌ها اتفاق می‌افتد عبارتند از: ضربه سرعت پایین (محدوده سرعت 3 تا 5 متر بر ثانیه)، ضربه ناشی از پرتابه‌های یخ و نقص‌های هنگام ساخت ماده. این آسیب‌ها ممکن است به طور قابل ملاحظه‌ای استحکام ماده مرکب را کاهش داده و منجر به شکست ساختاری فاجعه‌آمیز شوند. بنابراین، استحکام ماده در برابر تورق و چقرمگی مبنایی در مکانیک شکست بوده و در طراحی مهندسی اهمیت زیادی دارند.

سه مود اصلی برای چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای² وجود دارد. در این سه مود اصلی، نرخ آزادی انرژی کرنشی (G_I)، G_{II} و G_{III} یعنی انرژی آزاد شده، در واحد سطح تورق رشد می‌کنند [1]. در دو دهه اخیر توجه بیشتری به چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای شده است و آزمون تیر یکسرگردار دولبه³ به طور متداول برای این منظور استفاده می‌شود و روش‌های استاندارد به کار گرفته شده است [2 و 3].

از آنجاکه مواد مرکب با الیاف با بافت دوبعدی به طور گسترده در صنعت استفاده می‌شوند، بررسی‌های گسترده توسط تی⁴ [4]، برنر⁵ و همکارانش [5] بر روی رشد ترک و تورق تحت انواع بارگذاری انجام شده است. همچنین تحقیقات گسترده در سال‌های اخیر، بر روی تورق در مواد مرکب با زاویه‌های قرارگیری الیاف $0//0$ ، $0//\theta$ و $\theta//\theta$ در مرز مشترک بین‌لایه‌ای انجام شده است [6-9]. از طرفی سو⁶ و همکارانش نشان دادند که استحکام ماده در برابر تورق به هندسه نمونه وابسته است [10].

اثر پل‌زنی الیاف⁷ بر روی چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای توسط مورا⁸ و همکارانش بررسی شده است [11]. آن‌ها نشان دادند چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای بدون پل‌زنی الیاف در طول رشد ترک، مقدار ثابتی است. در حالی که اگر پل‌زنی الیاف اتفاق بیفتد، نرخ آزادی انرژی کرنش در طول رشد

ترک ثابت باقی نمی‌ماند و با افزایش طول رشد ترک، تورق افزایش می‌یابد. بنابراین در حالت کلی رفتار منحنی⁹ R برای دقت در پیش‌بینی مواد مرکب در طول رشد ترک از اهمیت بالایی برخوردار است.

از بررسی‌های فوق مشخص می‌شود منحنی R در کامپوزیت‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است و بیشتر تحقیقات به رفتار استحکام ماده که دارای ترک اولیه است و در مرز مشترک بین‌لایه‌ای دارای زاویه‌های قرارگیری گوناگون می‌باشند، وابسته است. کن و همکارانش¹⁰ [12] از یک روش تحلیلی برای بررسی استحکام ماده مرکب در تورق استفاده کردند و با استفاده از این نمودار نشان دادند که چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای با افزایش طول ترک افزایش می‌یابد. پترسکو¹¹ و همکارانش [13] به بررسی رفتار منحنی R در مواد مرکب با الیاف کربن پرداختند. شکرپه و¹² همکارانش [14] اثر طول ترک اولیه و ضخامت نمونه را بررسی کردند و نشان دادند چقرمگی شکست اولیه در یک محدوده مشخص ثابت می‌ماند. بررسی نتایج تجربی و مدلسازی بر روی رفتار منحنی R توسط نیکولاس¹³ و همکارانش [15] انجام شد. از آنجا که منحنی R به هندسه نمونه وابسته است، [7] لذا طول، عرض، ضخامت و طول ترک اولیه ثابت فرض شده است.

با توجه به اینکه در تحقیقات گذشته الیاف شیشه تک-جهته بیشتر مورد بررسی قرار گرفته است [8 و 16]، در این پژوهش، اثر زاویه قرارگیری الیاف در الیاف شیشه با بافت دو بعدی، که زاویه‌های مختلفی را در مرز مشترک میانی ایجاد می‌کنند، مورد بررسی قرار گرفته است.

2- آزمایش

2-1- مواد

در این پژوهش از الیاف شیشه با بافت دو بعدی (WR) و وزن واحد سطح 400 gr/m^2 تولید شده توسط شرکت کاملیاف ترکیه برای ساخت نمونه‌های مواد مرکب استفاده شده است.

¹ Delamination

² Interlaminar fracture toughness

³ Double cantilever beam (DCB)

⁴ Tay

⁵ Brunner

⁶ Suo

⁷ Fiber Bridging

⁸ Moura

⁹ R-Curve

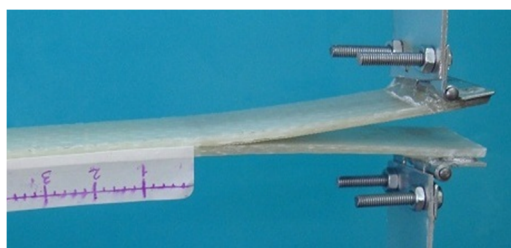
¹⁰ Kan

¹¹ Petrescu

¹² Shokrieh

¹³ Nicholls

است. سرعت بارگذاری 3 میلیمتر بر دقیقه می‌باشد. نمودار بار بر حسب جابه‌جایی هنگام بارگذاری توسط دستگاه گزارش می‌شود. با اعمال بارگذاری رشد ترک توسط دوربین کانن با لنز ماکرو 50 میلیمتر عکس برداری می‌شود. آغاز رشد ترک با مشاهده دقیق لبه‌های نمونه و تصاویر دوربین و نمودار بار - جابه‌جایی مشخص می‌شود. ترک در نمونه تقریباً 40 میلیمتر رشد می‌کند. شکل 1 نشان دهنده دستگاه و نمونه می‌باشد.



شکل 1- نمایی از دستگاه آزمون و نمونه

2-4- محاسبه چقرمگی شکست بین لایه‌ای

چقرمگی شکست بین لایه‌ای در مود I، که از نتایج آزمایش‌ها به دست آمده است، بر اساس سه روش استاندارد [2] محاسبه می‌شود:

1. روش تئوری تیر اصلاح شده¹:

$$G_{IC} = \frac{3P\delta}{2b(a+|\Delta|)}$$

2. روش تئوری اصلاح شده²:

$$G_{IC} = \frac{nP\delta}{2ba}$$

3. روش تئوری اصلاح شده کالیبره³:

$$G_{IC} = \frac{3P^2C^{2/3}}{2A_1bh}$$

با توجه به اینکه هر یک از روش‌های گفته شده بر دیگری ارجحیت ندارد [2] و با توجه به اینکه روش تئوری اصلاح شده برای مواد مرکب چند جهته استفاده می‌شود [17]، که در این پژوهش از روش دوم استفاده می‌شود. در این روابط a طول ترک، b عرض نمونه، n شیب قسمت

رزین پلیمری انتخاب شده از دو بخش تشکیل شده است که قسمت اول رزین اپوکسی با نام تجاری CO-207 با چگالی $1/31 \text{ gr/cm}^3$ و قسمت دوم شامل یک سخت‌کننده با نام تجاری HA-11 با چگالی $1/07 \text{ gr/cm}^3$ تولید شده توسط شرکت مهندسی مواد مکرر ایران می‌باشد که با نسبت وزنی 100:15 با یکدیگر مخلوط می‌شوند. یک لایه فیلم تفلون به ضخامت 20 میکرون برای ایجاد ترک اولیه در نمونه‌ها به کار گرفته شده است.

2-2- ساخت نمونه‌های مواد مرکب الیاف شیشه /

اپوکسی

الیاف‌های شیشه با بافت دوبعدی در ابعاد مورد نظر آماده شدند. اپوکسی و سخت‌کننده با نسبت وزنی 100:15 با یکدیگر به صورت دستی مخلوط شده و نمونه‌ها با روش لایه-چینی دستی با زاویه‌های قرارگیری الیاف به صورت $0/90$ و 45 ± 45 ساخته می‌شوند. برای پخت اولیه، نمونه‌ها به مدت 24 ساعت در دمای اتاق و پخت ثانویه به مدت 8 ساعت در دمای 80 درجه سانتی‌گراد در کوره انجام می‌شود. با سوزاندن نمونه‌ها، متوسط کسر حجمی الیاف 31/45٪ به دست آمد. در مواد مرکب مذکور، ترک اولیه در وسط نمونه با قراردادن ورق تفلون ایجاد شده است. با استفاده از سنگ الماس، نمونه‌ها با عرض 25 میلیمتر، طول 200 میلیمتر و طول ترک اولیه 55 میلیمتر برش داده شدند. برای از بین بردن عیوب هنگام ساخت و برش، لبه نمونه‌ها با کاغذ سمباده پرداخت شده‌اند. اتصالات از جنس آلومینیوم بر روی نمونه‌ها نصب شده است که از وارد آمدن بار به صورت نقطه‌ای جلوگیری شود. برای اندازه‌گیری رشد ترک در هنگام آزمون از یک سیستم اندازه‌گیری با فواصل 1 میلیمتر که بر روی نمونه چسبانده شد، استفاده شده است.

2-3- آزمایش DCB

دستگاه چند منظوره Santam STM150 با لودسل 50 کیلوگرم برای انجام آزمایش‌ها استفاده شده است.

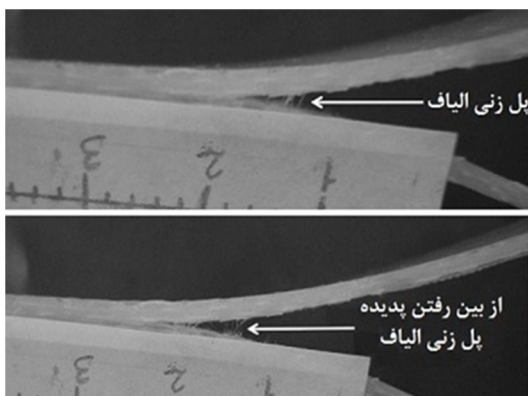
اتصالات آلومینیوم در گریپ‌های دستگاه محکم می‌شوند که اطمینان حاصل شود نمونه صاف و در مرکز قرار گرفته است. سیستم اندازه‌گیری با فواصل 1 میلیمتر در ابتدای ترک اولیه نمونه به منظور مشخص شدن رشد ترک قرار داده شده

¹ Modified beam theory (MBT)

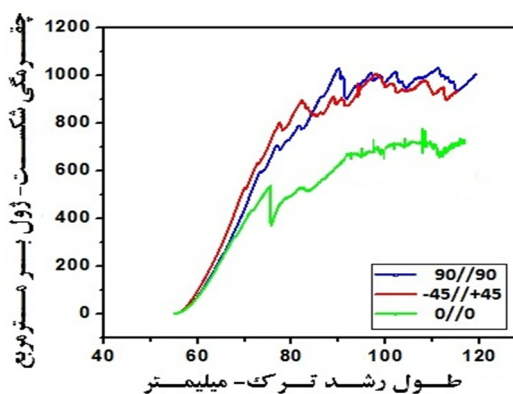
² Compliance calibration (CC)

³ Modified compliance calibration (MCC)

عبارتند از: مقدار چقرمگی شکست اولیه، منطقه پل زنی در الیاف و منطقه رشد ترک.



شکل 3- پدیده پل زنی الیاف قبل و بعد از رسیدن به نیروی ماکزیمم



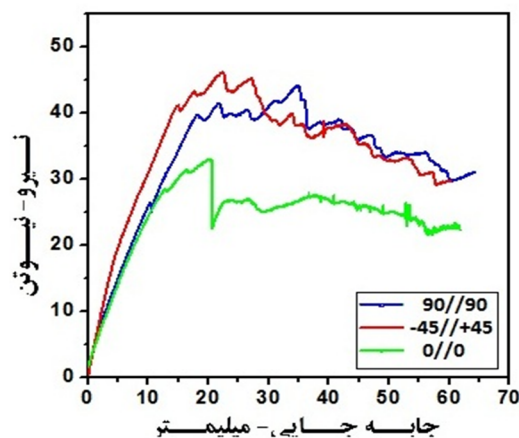
شکل 4- نمودار چقرمگی شکست بین لایه‌ای بر حسب طول ترک برای زاویه‌های قرارگیری مختلف در الیاف

به عبارتی می‌توان گفت در حالتی که زاویه قرارگیری الیاف در دو لایه میانی ترک اولیه 0//0 می‌باشد، جهت الیاف با جهت رشد ترک به صورت موازی می‌باشد (شکل 5-الف). زمانی که زاویه قرارگیری الیاف -45//+45 باشد، زاویه قرارگیری الیاف و جهت رشد ترک به صورت شکل 5-ب بوده که نسبت به حالت 0//0 تنش‌های بین‌لایه‌ای بیشتری دارد. و در نهایت با قرارگیری زاویه الیاف به صورت 90//90 جهت زاویه قرارگیری الیاف و جهت رشد ترک عمود بر هم خواهند بود که در این حالت بیشترین استحکام در برابر رشد ترک مشاهده می‌شود (شکل 5-ج).

خطی به دست آمده از نمودار بار بر حسب جابه‌جایی، P و δ بار و جابه‌جایی به دست آمده از نمودار آزمون می‌باشند.

3- بحث و نتیجه‌گیری

منحنی بار- جابه‌جایی برای نمونه‌ها در شکل 2 آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود زاویه قرارگیری الیاف در مرز میانی ترک اولیه، دارای سه حالت می‌باشد که در نمودار نشان داده شده است. قرارگیری زاویه‌های 0، 90 و ± 45 در سایر لایه‌ها باعث تغییر شیب منحنی می‌شود که به دلیل تفاوت در سفتی پیچشی نمونه‌ها می‌باشد. همه نمونه‌ها در منحنی بار- جابه‌جایی دارای رفتار خطی به غیرخطی می‌باشند، که به دلیل رشد ترک و تورق است.

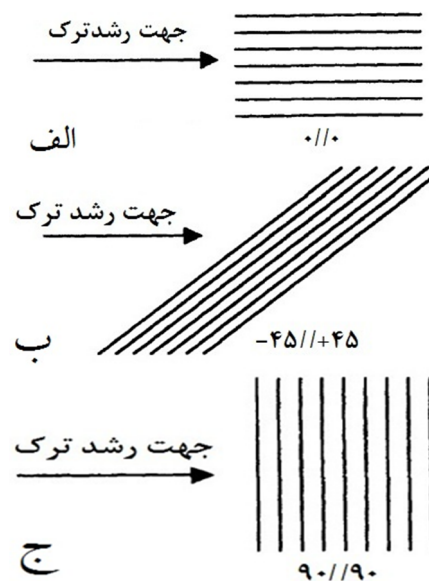


شکل 2- نمودار بار-جابه‌جایی برای زاویه‌های قرارگیری مختلف در الیاف

همان‌طور که مشاهده می‌شود، شیب منحنی‌ها با رشد ترک کاهش می‌یابند تا به ماکزیمم مقدار خود برسند که این مقدار ماکزیمم به دلیل پدیده پل زنی در الیاف می‌باشد (شکل 3). بعد از پدیده پل زنی در الیاف، مجدداً شیب منحنی‌ها کاهش یافته و این روند ادامه می‌یابد. نتایج نشان می‌دهند که تغییر در زاویه قرارگیری الیاف از 0 به 90 درجه باعث تاخیر در تبدیل ناحیه خطی به غیرخطی شده و پدیده پل زنی در الیاف نیز به تاخیر می‌افتد.

در شکل 4 منحنی چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای برای همه نمونه‌ها بر اساس روش گفته شده در قسمت 2-4، رسم شده است. در این منحنی، موارد زیر قابل بررسی هستند که

- of developments from 1990 to 2001. Applied Mechanics Reviews 56: 1–23.
- [5] Brunner AJ, Blackman BRK, Davies P (2008) Mode II initiation fracture toughness analysis for wood obtained by 3-ENF test. Engineering Fracture Mechanics 75: 2779–2794.
- [6] Chai H (1984) The effect of defects in tubes: Part 1. Mode I delamination resistance. Composites 15: 277–290.
- [7] Gutkin R, Laffan ML, Pinho ST, Robinson P, Curtis PT (2011) Modelling the R-curve effect and its specimen-dependence. International Journal of Solids and Structures 48: 1767–1777.
- [8] Shetty MR, Vijay Kumar KR, Sudhir S, Raghu P, Madhuranath AD (2000) Effect of fiber orientation on mode I interlaminar fracture toughness of glass epoxy composites. Journal of Reinforced Plastics and Composites 19: 606–620.
- [9] Miyagawa H, Sato C, Ikegami K (2009) Effect of fiber orientation on mode I fracture toughness of CFRP. Polymer 115: 2–9.
- [10] Suo Z, Bao G, Fan B (1992) Limiting mechanisms of mode I interlaminar toughening of composites reinforced with aligned carbon nanotubes. Journal of Mechanics Physics Solids 40: 1–16.
- [11] De Moura MFSF, Campilho RDSG, Amaro AM, Reis PNB (2010) Interlaminar and intralaminar fracture characterization of composites under mode I loading. Composite Structures 92: 144–149.
- [12] Kan HP, Deo RB, Shah C, Kinslow R (1987) Resistance curve approach to predicting residual strength of composites. Air Force Office of Scientific Research 20332-6448, Report No. AFOSR-TR-87-0062.
- [13] Petrescu I, Mohora C, Ispas C, (2011) Interlaminar fracture toughness behavior for CFRP unidirectional laminates using DCB test. Proceedings of the 22nd International DAAAM Symposium, Vienna, Austria, EU.
- [14] Shokrieh MM, Heidari-Rarani M, Ayatollahi MA (2012) Delamination R-curve as a material property of unidirectional glass/epoxy composites. Materials and Design 34: 211–218.
- [15] Nicholls DJ, Gallagher JPJ (1983) Effect of fiber orientation on mode I fracture toughness. Reinforced Plastic Composite 2(3): 168–183.
- [16] Shokrieh MM, Heidari-Rarani M (2011) Effect of stacking sequence on R-curve behavior of glass/epoxy DCB laminates with 0°/0° crack interface. Materials Science and Engineering A 529: 265–269.
- [17] Gong XJ, Hurez A, Verchery G (2010) On the determination of delamination toughness by using multidirectional DCB specimens. Polymer Testing 29(6): 658–666.



شکل 5- طرح شماتیک رشد ترک در مواد مرکب با زاویه‌های قرارگیری مختلف الیاف

4- نتایج

همان‌طور که مشاهده شد، تغییر در زاویه قرارگیری الیاف در مواد مرکب الیاف شیشه با بافت دو بعدی باعث افزایش استحکام ماده در برابر تورق می‌شود. به عبارتی با تغییر در زاویه الیاف از 0 به 45 و از 45 به 90 تنش‌های بین‌لایه‌ای افزایش یافته و این امر باعث می‌شود پدیده پل‌زنی در الیاف به تاخیر بیفتد و در نتیجه نیروی ماکزیمم افزایش می‌یابد.

مراجع

- [1] William JG (1989) Fracture mechanics of anisotropic materials. Composite Material Series Application of Fracture Mechanics to Composite Materials 6: 3–38.
- [2] ASTM Standard D5528-94a, Standard test method for mode I interlaminar fracture toughness of unidirectional continuous fiber reinforced polymer matrix composites. Philadelphia, PA, 1994.
- [3] Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials 1. Annual Book of ASTM Standards: 1-11 (2008).
- [4] Tay TE (2003) Characterization and analysis of delamination fracture in composites: An overview