

Study of different parameters in mode I delamination of glass/polyester composites by acoustic emission monitoring

Abstract

Delamination is one of the most common failure modes of composite materials. The presence of delamination in the composite material may reduce the overall stiffness. The geometrical parameters, material properties, loading conditions and mid-plane layouts are important factors which effect the initiation and growth of delamination. In this paper different velocities and thicknesses are used. Experimental results have obtained from monotonic tests and have been shown good agreement between crack-growth data. Previous studies made on different composite materials have allowed us to set up a schematic model of acoustic emission. At current work, both different levels of absolute energy of acoustic emission signals and mechanical energy are identified for different velocities and thicknesses. The experimental method has been applied to this work and allows continuous and alive monitoring of damage growth through delamination tests. Finally, agreement between acoustic emission absolute energy and microscopic observations is considerable.

Keywords: Composite- Acoustic Signals- Glass/Polyester- Mid Plane Layout

بررسی اثر پارامترهای مختلف در جدایش لایه‌ای مد I کامپوزیت- های شیشه/پلی‌استر با استفاده از روش بازرسی آکوستیک ایمیشن

چکیده

جدایش بین لایه‌ای در مواد کامپوزیتی یکی از انواع عیوب داخلی است که وجود چنین عیبی باعث افت استحکام در سازه‌های کامپوزیتی گردیده و باعث ایجاد خسارات جبران ناپذیری می‌شود؛ بنابراین تعیین رفتار مکانیزم جدایش بین لایه‌ای در طراحی مواد و سازه‌های کامپوزیتی اهمیت زیادی دارد. در این مقاله به بررسی و تحلیل سیگنال‌های آکوستیکی منتشر شده از کامپوزیت‌های شیشه/پلی‌استر پرداخته شده است. در ابتدا مد I جدایش بین لایه‌ای بر روی نمونه‌های کامپوزیتی تست شده و سیگنال‌هایی آکوستیکی حاصل با نوع ترک و جدایش لایه‌ای مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. در نهایت با بررسی سیگنال‌های منتشر شده و مشاهدات بدست آمده، مقاومت چسبندگی الیاف شیشه با پلی‌استر با امواج ساطع شده آکوستیکی در سرعت‌ها، ضخامت‌ها و در لایه‌چینی‌های میانی مختلف مقایسه شدند. نتایج حاصل ارتباط بین جدایش لایه‌ای و سیگنال‌های آکوستیکی را تایید می‌کند.

واژه‌های کلیدی: کامپوزیت-سیگنال‌های آکوستیکی-شیشه/پلی‌استر-لایه‌چینی میانی

۱-مقدمه

جدایش لایه‌ای یکی از مهمترین انواع خرابی در کامپوزیت‌های لایه‌ای است که می‌تواند باعث خسارات جبران ناپذیری گردد. پارامترهای هندسی، خواص مواد، سرعت بارگذاری و نوع لایه چینی مهمترین فاکتورهایی هستند که در شروع و رشد این نوع ترک نقش دارند. اگر چه برای یک درک جامع از جدایش لایه‌ای اثرات رطوبت، دما و... روی این پدیده می‌بایستی به طور کامل توصیف شود، چراکه خواص مکانیکی زمینه مانند سایر پلیمرها به شدت وابسته به این پارامترها می‌باشد. مطالعات زیادی برای توصیف رفتار شکست درون لایه‌ای در کامپوزیت‌های لایه‌ای باید صورت پذیرد. پیش از این تحقیقات زیادی روی اثرات پارامترهای مختلف در جدایش لایه‌ای مد I انواع کامپوزیت‌ها صورت گرفته است. در این تست از استاندارد ASTM D5528 [1] برای محاسبات و نحوه بارگذاری استفاده شده است. به کمک داده‌های بدست آمده نمودارهایی ترسیم شد و نتیجه‌گیری صورت گرفت. استاندارد D5528 روش انجام آزمایش بازشدگی لایه‌ای مد I و شرایط حاکم بر آن را مشخص می‌کند.

تفاوت کارهای صورت گرفته‌ی قبلی در سرعت بارگذاری، روش بارگذاری، و نوع بدست آوردن داده‌ها بود. به طور مثال Naveed A. Siddiqui [2] از داده‌های کرنش سنج و Takayuki Kusaka [3] از آکوستیک امیشن برای گرفتن داده استفاده کردند. در

سال ۲۰۰۶، Xiannian Sun [4] نوع بارگذاری بلوکی را به طور پارامتریک مورد مطالعه قرار داد و نتایج نشان می دهد که هر چقدر سطح تماس بلوک با کامپوزیت کمتر باشد منطقه ی پل شده بیشتر می شود همچنین شکست به سمت شکست ترد پیش می رود. در سال ۲۰۰۴، Gwo-Chung Tsai [5] به بررسی اثر روش بارگذاری در مقدار سرعت انرژی آزاد شده پرداخت و مشاهده کرد که هر چه سرعت بارگذاری بیشتر می شود چگالی انرژی کمتر می گردد اما مقدار آن بیشتر است.

۲- جنس و هندسه ی نمونه ها

کامپوزیت مورد استفاده در این تست رزین ترد پلی استر به عنوان ماتریس و لایه های شیشه به صورت الیاف بافته شده و تک جهت می باشد. چگالی سطحی الیاف برای الیاف با تارو پود 165 gr/m^2 و برای الیاف تک جهت $500 \frac{\text{gr}}{\text{m}^2}$ است. مواد از پیش بارور کردن لایه ها در قالب خلا درست شده اند. از سه نوع قطعه با ضخامت های ۳.۵، ۴.۵ و ۱۰.۵ میلی متر که یک ترک اولیه با استفاده از قرار دادن یک لایه ی غیر چسبناک در بین دو لایه ی میانی هنگام ساخت و قبل از پختن بوجود آمده است تشکیل شده است. هندسه ی نمونه بر طبق استاندارد D5528، عرض ۲۰ و طول ۱۳۰ میلی متر، است. بار به دو قسمت انتهایی قطعه که در روی هر طرف آن سه مهره به جای یک بلوک چسبانده شده است وارد شد و رشد ترک تا ۳۰ میلی متر ایجاد شد.

۳- نرخ آزاد شدن انرژی کرنشی در کامپوزیت های لایه ای

رفتار شکست مواد غیر ایزوتروپ به کمک مقادیر G_i (انرژی مکانیکی) محاسبه می شود. فاکتورهای زیادی از قبیل لغزش فیبرها روی ماتریس، شکست فیبرها، ترک ماتریس و گسترش لایه ای شدن به همان میزان که روی مقاومت شکست کامپوزیت های لایه ای و مقاومت میانی بین ماتریس و فیبر تاثیر دارد روی خود مقاومت ماتریس تاثیر می گذارد. [5]. سه نوع ترک مهم در مواد کامپوزیتی وجود دارد: ۱- ترک inter-laminar، ۲- ترک intra-laminar، ۳- ترک trans-laminar که به طور کلی عیب لایه ای شدن در نتیجه ی ترک inter-laminar است، بنابر این از نرخ آزاد شدن انرژی کرنشی و همچنین انرژی بحرانی برای تعیین شروع و رشد ترک استفاده می شود. گفتنی است قبل از شروع تست های اصلی برای اطمینان حاصل کردن از اینکه اکوستیک مشاهده شده مربوط به جدایش لایه ای است و نه تغییر شکل قطعه در یک قطعه خیز ایجاد شد اما اکوستیکی مشاهده نشد، که می توان نتیجه گرفت تنها اکوستیک های گرفته شده مربوط به شکستن فیبرها و پاره شدن چسب می باشد.

۴- بحث و نتایج

نرخ آزاد شدن انرژی کرنشی بحرانی در نمونه به صورت زیر بدست می آید [6]:

$$G_{ic} = -\frac{1}{b} \frac{\partial \Pi}{\partial a} \quad (1)$$

که در آن b عرض قطعه، $\Pi = (U - W_{ext})$ به عنوان انرژی پتانسیل کل، U انرژی کرنشی ذخیره شده در سیستم، w کار انجام شده توسط نیروی خارجی و δ فاصله ی بازشدگی بین دو بازو می باشد. بنابر این

$$G_{ic} = \frac{1}{2b} p \frac{\partial \delta}{\partial a} \quad (2)$$

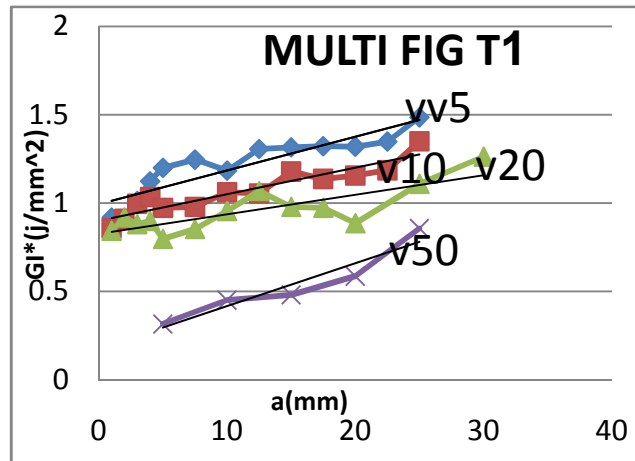
بنابراین ماکزیمم بازشدگی در انتهای آزاد برای یک تیر یک طرف گیردار مساوی $u = \frac{pa^3}{3EI}$ است، که در آن E مدول یانگ و I مقدار گشتاور ماند تیر می باشد. کل بازشدگی در نمونه ی DCB، $\delta = 2\Pi$ می باشد. بنابراین مقدار بازشدگی ترک در نمونه ی DCB:

$$\delta = \frac{2pa^3}{3EI} \quad (3)$$

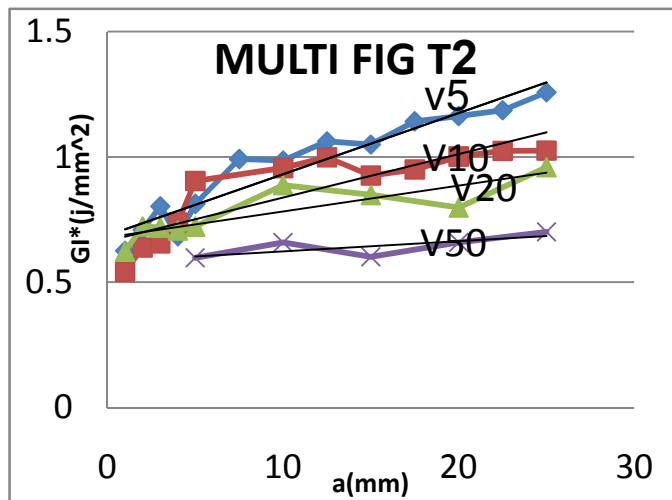
است. با قرار دادن معادله‌ی ۳ در ۲ بدست می‌آید:

$$G_{ic} = \frac{p^2 a^2}{bEI} = \frac{3 \delta p}{2 ba} \quad (4)$$

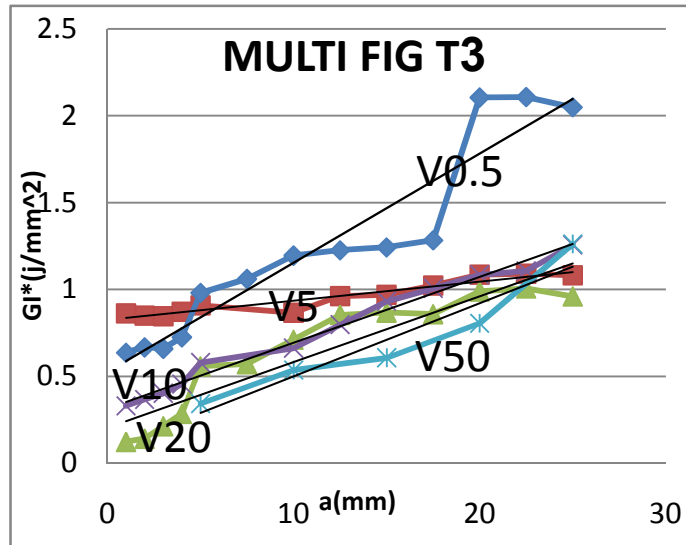
معادله‌ی ۳ به فرض ثابت بودن کامل انتهای قطعه بدست آمده است. پس بازشدگی در انتهای قطعه صفر است. در این تحقیق هم شروع ترک و هم رشد بازشدگی آن در حالت پایدار بررسی شده است.



نمودار ۱- نمودار انرژی مکانیکی G_i بر حسب مقدار بازشدگی ترک قطعه ۳



نمودار ۲- نمودار انرژی مکانیکی G_i بر حسب مقدار بازشدگی ترک قطعه ۴



نمودار ۳- نمودار انرژی مکانیکی G_I^* بر حسب مقدار بازشدگی ترک a قطعه ۵

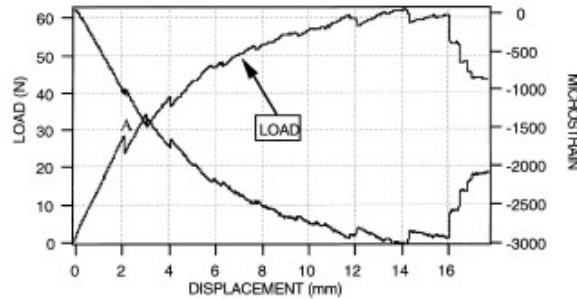
از مقایسه نمودارهای بالا به این نتایج می‌توان دست یافت :

۱- در هر کدام از قطعات با افزایش سرعت جدایش (سرعت حرکت فک‌های دستگاه کشش) انرژی مکانیکی (مقدار نیرویی که در واحد طول صرف جدا کردن لایه‌های کامپوزیت‌ها شده است) کمتر شده است و همواره بیشترین انرژی برای کمترین سرعت و کمترین انرژی برای بیشترین سرعت است. این پدیده به علت آن است که با افزایش سرعت جدایش لایه‌ها زمان برای تغییر شکل کامپوزیت کمتر می‌شود و نیروی کمتری صرف تغییر شکل می‌گردد، در نتیجه مقدار انرژی کمتر می‌شود. در سال ۲۰۰۶، G.Hug [7] با تستی مشابه در مورد کامپوزیت‌های مختلف و همچنین در سال ۱۹۹۷، Takayuki kusaka در مورد کامپوزیت‌های کربن-فیبر/اپوکسی به نتیجه‌ی مشابهی رسیده بودند. همچنین در سال ۱۹۹۸، S.Benmedakhene [8] مشاهده کرد که هر چه سرعت جدایش افزایش می‌یابد شکست رزین تردتر می‌شود که در این تست نتایج مشابه بدست آمد.

۲- در هر کدام از نمونه‌ها و در هر کدام از سرعت‌ها همواره نمودار $G_I - a$ صعودی است .

۳- هر چه ضخامت قطعات بیشتر شود (در سرعت‌های مختلف) انرژی کمتر می‌شود چون در ضخامت‌های کم مقدار انرژی بیشتری صرف تغییر شکل می‌گردد (گفتنی است در فرمول G_I تأثیر ضخامت به حد ممکن حذف شده است). این نتیجه مشابه نتیجه‌ی ۱ است پس می‌توان استدلال کرد که تأثیر سرعت و ضخامت در مثل هم است و تأثیر هر دو مستقیم است.

۴- با دو ضخامت برابر انرژی جدایش لایه‌ها در حالت لایه‌های میانی هر دو با تار و پود بیشتر از انرژی جدایش لایه‌ها در حالت لایه‌های میانی یکی به صورت تک جهته و یکی با تاروپود است . این نشان می‌دهد که انرژی چسبندگی در حالت دو تار و پود از یکی تک جهته و یکی با تاروپود بیشتر است. در سال ۲۰۰۸، S.Solaimurugan در مورد کامپوزیت‌های شیشه/پلی استر به همین نتیجه رسیده بود که در نمودار ۴ آورده شده است [9].



نمودار ۴- نمودار Load & Microstrain بر حسب باز شدگی a که توسط S. Benmedakhene رسم شده است [9].

۵- در قطعات ۱ و ۲ خطوط گذرنده حالت واگرا و در قطعه ۳ حالت همگرا دارند، قطعه ۲ که نازکترین است واگراترین حالت را دارد، بنا به اینکه هر قدر ضخامت بیشتر و هر قدر سرعت جدایش بیشتر شود زمان برای تغییر شکل کمتر است و مقدار انرژی بیشتری فقط صرف جدایش لایه‌ای می‌شود، می‌توان نتیجه گرفت وقتی کامپوزیت از حدی ضخیم‌تر باشد از سرعتی مشخص به بالا ثابتی برای جدایش نیاز دارد که دیگر وابسته به ضخامت و سرعت نیست.

۵- نتیجه‌گیری :

این تحقیق برای درک تاثیر پارامترهای مختلف بر روی شروع و رشد لایه لایه شدن مد ۱ در بازه‌ی وسیعی از سرعت‌ها (50 تا 5 $\frac{mm}{min}$) صورت گرفت. نتایج بدست آمده در این تحقیق افزایش انرژی مکانیکی را به عنوان تابع سرعت نشان می‌دهد. در حقیقت با افزایش سرعت، ماتریس حالت تردتری به خود می‌گیرد. بعضی نتایج بدست آمده در تحقیقات متفاوت است که این می‌تواند مربوط به یکسان نبودن مواد استفاده شده و شرایط مختلف تست که به وسیله‌ی افراد مختلف انجام شده است، باشد.

مراجع

- 1- ASTM D5528-94a ,standard test method for : "mode 1 interlaminar fracture toughness of unidirectional fiber-reinforced polymer matrix composites".
- 2- Naveed A.Siddiqui ,Ricky S.C. Woo ,Jang-Kyo Kim ,Christopher C.K.Leung, Arshad Munir, "Mode 1 interlaminar fracture behavior and mechanical properties of CFRPs with nanoclay-filled epoxy matrix", composites part A 38(2007)449-460 ,2006.
- 3- Takayuki Kusaka ,Masaki Hojo ,Yiu-Wing Mai ,Tomoaki Kurokawa, Takatoshi Nojima &Shojiro Ochiai , "Rate Dependence of Mode 1 Fracture Behaviour In Carbon-Fiber/Epoxy Composite Laminates", composites science and technology 58(1998)591-602,1997.
- 4- Xiannian Sun ,Michael D.K.Wood ,Liyong Tong , "Aparametric study on the design of stitched laminated DCB specimens ", composite structure 75(2006)72-78 ,2006.
- 5- Gwo-Chung Tsai ,Jun-Wei Chen , "Effect of stitching on mode 1 strain energy release rate", composite structures 69(2005)1-9 ,2006.
- 6- S.Solaimurugan ,R.Velmurugan , "Influence of in-plane fibre orientation on mode 1 interlaminar fracture toughness of stitched glass/polyester composites", composites science and technology 68(2008)1742-1752 ,2008.
- 7- G.Hug ,P.Thevenet ,J.Fitoussi ,D.Baptiste , "Effect of the loading rate on mode 1 interlaminar fracture toughness of laminated composites", engineering fracture mechanics 73(2006)2456-2462 ,2006.
- 8- S.Benmedakhene ,M.Kenane ,M.L.Benzeggagh , "Initiation and growth of delamination in glass/epoxy composites subjected to static and dynamic loading by acoustic emission monitoring", composites science and technology 59(1999)201-208 ,1998.
- 9- S.Solaimurugan ,R.Velmurugan , "Influence of in-plane fibre orientation on mode 1 interlaminar fracture toughness of stitched glass/polyester composites", composites science and technology 68(2008)1742-1752 ,2008

