Archive of SID

مجله مهندسی مکانیک، شماره پیاپی ۸۲، جلد ۴۸، شماره ۱، بهار ۱۳۹۷، صفحه ۱۹-۲۶

بررسی مقاومت به ضربه سرعت بالا در صفحات مشبک کامپوزیتی حاوی نانولوله‌های‌کربنی

رضا اسلامی فارسانی* دانشیار، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی و علم مواد، تهران، ایران

علیرضا شهرابی فراهانی دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی و علم مواد، تهران، ایران

چکیده

کامپوزیت های مشبک به علت طراحی خاص (متشکل از شبکه ای از تقویت‌کننده‌ها که عموماً روی یک پوسته قرار گرفته اند)، از استحکام و سفتی ویژه بالا، و جذب انرژی فوق‌العاده خوبی برخوردار هستند. در تحقیق حاضر، نمونه های صفحات مشبک کامپوزیتی زمینه پلیمری ساخته شده و اثر افزودن نانولوله‌های‌کربنی چندجداره در درصدهای وزنی مختلف (۰، ۰/۱، ۰/۲۵ و ۰/۴) بر رفتار ضربه سرعت بالای این کامپوزیت ها به صورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین منظور، ابتدا نانولوله‌های‌کربنی چندجداره با استفاده از همزن مکانیکی و امواج اولتراسونیک درون زمینه پلیمری توزیع شدند. سپس صفحات مشبک کامپوزیتی پلیمری حاوی نانولوله‌های‌کربنی با هندسه شش‌ضلعی با استفاده از روش لایه‌گذاری‌دستی ساخته شدند و آزمون ضربه سرعت بالا بر روی این صفحات به وسیله پرتابه استوانه‌ای با دماغه مخروطی صورت پذیرفت. نتایج تجربی نشان داد که حضور شبکه ریب‌های تقویت‌شده با الیاف کربن موجب محدود شدن سطح شکست و افزایش انرژی جذب شده می‌گردند. بهترین رفتار ضربه سرعت بالا برای صفحات مشبک کامپوزیتی به ازای افزودن ۰/۴ درصد وزنی نانولوله‌های‌کربنی حاصل می‌شود. در این حالت، سرعت حد بالستیک و میزان انرژی جذب شده طی فرآیند ضربه به ترتیب به میزان ۱۱ و ۲۲ درصد نسبت به صفحات مشبک کامپوزیتی فاقد نانولوله‌های‌کربنی، افزایش یافت. همچنین به ازای افزودن نانولوله‌های‌کربنی چندجداره، میزان سطح تخریب صفحات مشبک کامپوزیتی کاهش یافت.

واژه‌های کلیدی: کامپوزیت مشبک، نانولوله‌های‌کربنی چندجداره، ضربه سرعت بالا، انرژی جذب شده.

Investigation on the High-velocity Impact Resistance in Grid Composite Plates Containing Carbon Nanotubes

R. Eslami-Farsani Faculty of Materials Science and Engineering, Toosi University of Technology, Tehran, Iran

A. Shahrabi-Farahani Faculty of Materials Science and Engineering, Toosi University of Technology, Tehran, Iran

Abstract

Grid composite structures are a new generation of composite materials which due to their unique design (consist of network of stiffeners which have been located upon a skin) possess high specific strength and stiffness, as well as excellent energy absorption. In this study, the effect of addition of multi walled carbon nanotubes in various weight percentages (0, 0.1, 0.25 and 0.4) on the high-velocity impact properties of grid composite plates was investigated. Multi-walled carbon nanotubes by using mechanical stirrer and ultrasonic waves were dispersed into the polymeric matrix. Grid composite plates with hexagonal geometry were fabricated by hand lay-up method and then high velocity impact test by cylindrical projectile with conical nose was performed on these plates. Experimental results showed that the presence of network of ribs which reinforced with carbon fibers restricts the damaged area and increases the energy absorption. For grid composite plates, the best high-velocity impact behavior was obtained with the addition of 0.4 wt. % of carbon nanotubes which in this case, the ballistic limit velocity and absorbed energy during high-velocity impact was increased by 11 and 22%, respectively. Also with the addition of multi walled carbon nanotubes, the damage size of grid composite plates was decreased.

Keywords: Grid composite, Multi-walled carbon nanotubes, High-velocity impact, Energy absorption.

۱- مقدمه

کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت شده با الیاف به دلیل دارا بودن مشخصات ویژه از جمله وزن مخصوص پایین، استحکام ویژه بالا، سفتی ویژه بالا، مقاومت به خوردگی بالا، مقاومت به خستگی بالا و سهولت تولید مورد توجه صنایع مختلف قرار گرفته‌اند [۱]. کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت‌شده با الیاف پراستحکام با توسعه در قالب سازه‌های مشبک کامپوزیتی، نسل جدیدی از کامپوزیت‌های پیشرفته پرکاربرد را معرفی کرده‌اند. سازه‌های مشبک کامپوزیتی به دلیل دارا بودن خواصی نظیر استحکام ویژه بالا، سبکی، سفتی ویژه بالا، ظرفیت تحمل بار بالا، قابلیت جذب انرژی فوق‌العاده و تحمل تخریب بالا[1]، کاربردهای زیادی در صنایع هوایی، صنایع هوا و فضا، صنایع کشتی‌سازی، هسته‌ای و نفت و گاز، دارا می‌باشند [۲-۵].

سازه مشبک کامپوزیتی از مجموعه یکپارچه و به‌هم‌پیوسته کامپوزیتی شامل پوسته[2] و شبکه تقویت‌کننده (ریب‌ها[3])، تشکیل شده‌اند. در این سازه‌ها، ریب‌ها جزء اصلی تحمل‌کننده بار هستند که دارای ساختار تک‌جهته[4] هستند. استفاده از ریب‌ها باعث افزایش قابل‌توجه ظرفیت تحمل بار و جذب انرژی بدون افزایش قابل توجه در وزن می‌شوند [۶-۱۰]. ضخامت پوسته در این سازه‌ها را تا حد امکان باید کاهش داد زیرا افزایش ضخامت پوسته منجر به افزایش وزن سازه

[1] Damage tolerance
[2] Skin
[3] Ribs
[4] Unidirectional

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: eslami@kntu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۲/۲۹
تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۵/۳۱

www.SID.ir

Archive of SID

و کاهش استحکام ویژه و سفتی ویژه می‌گردد. نوع بهینه پیکربندی شبکه ریب‌ها بسته به نوع کاربرد، شرایط بارگذاری، هزینه و سایر عوامل تعیین می‌گردد [۱۱،۱۲].

با توجه به کاربردهای حساس این سازه‌ها در صنایع هوا و فضا، در طول عملکردشان بارگذاری‌های مختلف از جمله برخورد با اشیاء خارجی را تجربه می‌کنند و باید در برابر آسیب‌های وارده ناشی از ضربه سرعت بالا، مقاومت بیشتری از خود نشان‌دهند. بنابراین بررسی رفتار آنها تحت بارگذاری ضربه سرعت بالا از اهمیت بسزایی برخوردار است. تاکنون تحقیقات زیادی برای بهبود مقاومت به ضربه سرعت بالای مواد کامپوزیتی انجام شده است. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که اصلاح کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت شده با الیاف از طریق افزودن نانوفیلرها[1] منجر به بهبود خواص ضربه سرعت بالای مواد کامپوزیتی می‌شود [۱۳-۱۹]. میزان بهبود خواص مکانیکی با استفاده از نانوفیلرها بستگی به نسبت وزنی ذرات، کیفیت و روش پخش نانوذرات بستگی دارد [۲۰].

پاندیا و همکاران [۱۳]، به بررسی اثر نانولوله‌های‌کربنی بر رفتار بالستیک کامپوزیت الیاف شیشه/ اپوکسی پرداختند و نشان دادند و به ازای افزودن ۰/۵ درصد وزنی نانولوله‌های‌کربنی، میزان انرژی جذب شده طی فرآیند ضربه به میزان ۱۵ درصد در مقایسه با کامپوزیت فاقد نانولوله‌های‌کربنی، افزایش می‌یابد. ولمروگان و همکاران [۱۴]، نشان دادند که با افزودن ۲ درصد وزنی نانورس به کامپوزیت اپوکسی/ الیاف شیشه، سرعت حد بالستیک به میزان ۲۰ درصد در مقایسه با کامپوزیت فاقد نانورس افزایش می‌یابد.

رحمان و همکاران [۱۵]، نشان دادند که با افزودن ۰/۳ درصد وزنی نانولوله‌های‌کربنی منجر به افزایش ۶ درصد سرعت حد بالستیک کامپوزیت اپوکسی/ الیاف شیشه می‌گردد و با افزودن ۰/۵ درصد وزنی نانولوله‌های‌کربنی، سرعت حد بالستیک کاهش می‌یابد که ناشی از آگلومره‌شدن نانولوله‌های‌کربنی است. لورنزی و همکاران [۱۶]، نشان دادند که با افزودن ۰/۵ درصد وزنی نانولوله‌های‌کربنی، جذب انرژی کامپوزیت اپوکسی/ الیاف کولار ، به میزان ۵۶ درصد افزایش می‌یابد.

پل و همکاران [۱۷]، به بررسی تجربی تاثیر نانورس بر رفتار بالستیک کامپوزیت اپوکسی/ الیاف شیشه پرداختند که به روش انتقال رزین به کمک خلاء۲ ساخته شدند. آنها نشان دادند با افزودن ۵ درصد وزنی نانورس، میزان انرژی جذب شده به میزان ۵ درصد افزایش می‌یابد ولی با افزودن ۷ درصد وزنی ناورس میزان انرژی جذب شده کاهش یافت که ناشی از توزیع نامطلوب نانورس در زمینه پلیمری بود. نتایج تحقیقات بودو و همکاران [۱۸]، نشان داد که با رشد نانولوله‌های‌کربنی بر روی سطح الیاف شیشه، سرعت حد بالستیک کامپوزیت پلی‌اتیلن/ الیاف شیشه به میزان ۱۱ درصد افزایش می‌یابد.

گیبسون و همکاران [۱۹]، نشان دادند که افزودن ۰/۵ درصد وزنی نانولوله‌های‌کربنی به کامپوزیت زمینه اپوکسی/ الیاف کولار منجر به افزایش ۲۲ درصدی جذب انرژی کامپوزیت می‌شود.

بر طبق بررسی‌های صورت گرفته، بیشتر تحقیقات انجام شده در زمینه سازه‌های مشبک کامپوزیتی بر روی بهینه‌سازی پارامترهای هندسی متمرکز شده است و تحقیقات کمی در ارتباط با اثر استفاده از نانوذرات بر خواص مکانیکی این سازه‌ها صورت پذیرفته است. بر این اساس در تحقیق حاضر، تاثیر افزودن نانولوله‌های‌کربنی حاوی گروه‌های عاملی کربوکسیل در درصدهای وزنی مختلف نسبت به زمینه پلیمری بر رفتار ضربه سرعت بالای صفحات مشبک کامپوزیتی با هندسه شش ضلعی، به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت.

۲- روش آزمایش

۲-۱- مواد اولیه

در این تحقیق، رزین اپوکسی ML-506 با هاردنر HA-11 به عنوان زمینه کامپوزیت مورد استفاده قرار گرفت. از پارچه الیاف شیشه نوع E با چگالی سطحی $۴۰۰ g/m^2$ نیز به عنوان تقویت‌کننده پوسته سازه مشبک استفاده شد. همچنین رووینگ الیاف کربن با دانسیته $۱/۷۶ g/cm^3$، مدول کششی ۱۸۰ GPa، استحکام کششی ۲۶۰۰MPa و قطر متوسط ۷/۶ µm به عنوان تقویت‌کننده ریب‌ها بکار گرفته شد. نانولوله‌های‌کربنی عامل‌دار حاوی گروه عاملی کربوکسیل (MWCNT-COOH) با خلوص بیش از ۹۵٪، مساحت سطح ویژه $۲۳۳ m^2/g$ و قطر خارجی ۲۰-۱۰ نانومتر نیز به عنوان تقویت‌کننده نانومتری مورد استفاده قرار گرفتند.

۲-۲- ساخت قالب

برای ساخت نمونه‌های مشبک کامپوزیتی از قالب سیلیکونی[3] استفاده شد. در ابتدا روی یک ورق از جنس پلی‌وینیل‌کلراید[4] طرح شبکه مشبک و شابلون ایجاد شد. سیلیکون قالب‌گیری همراه با هاردنر به خوبی مخلوط شده و مخلوط حاصله درون شابلون ریخته شد و پس از عمل پخت[5]، قالب از شابلون جدا گردید. در شکل ۱ نمایی از قالب و شابلون نمایش داده شده است.

(الف)

(ب)

شکل ۱- نمایی از الف) شابلون مورد استفاده برای ساخت قالب و ب) قالب برای ساخت صفحات مشبک کامپوزیتی

[1] Nanofilles
[2] Vaccum resin transfer molding
[3] Silicone mold
[4] Poly vinyl chloride
[5] Curing

www.SID.ir

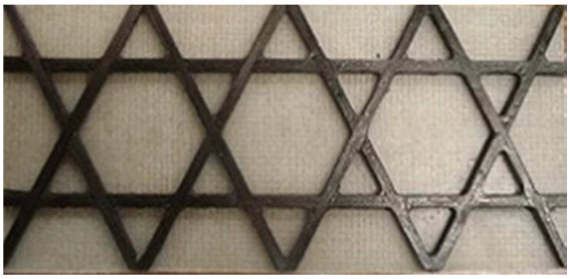
Archive of SID

۲-۳- آماده سازی مخلوط اپوکسی/ نانولوله‌های‌کربنی

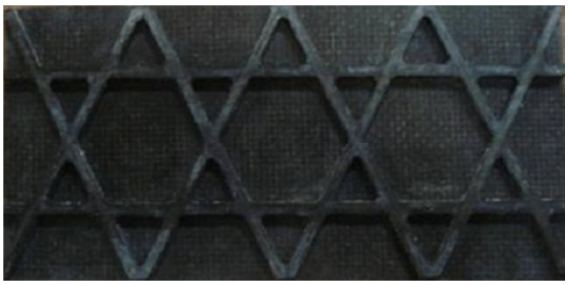
به منظور پایین آوردن لزجت رزین، رزین اپوکسی با استون به نسبت ۱۰۰ به ۱۵ رقیق شد. در مرحله بعد نانولوله‌های‌کربنی به مقدار ۰، ۰/۱، ۰/۲۵ و ۰/۴ درصد وزنی به رزین اضافه گردیدند و با استفاده از هم‌زن مکانیکی[1] عملیات اختلاط اولیه صورت گرفت. به منظور دست‌یابی به توزیع بهتر نانولوله‌های‌کربنی درون زمینه پلیمری، مخلوط حاصله تحت امواج اولتراسونیک[2] قرار گرفت. به منظور از بین رفتن حباب‌های هوا و تبخیر استون، مخلوط توسط پمپ خلاء هواگیری شد.

۲-۴- ساخت کامپوزیت مشبک حاوی نانولوله‌های‌کربنی

برای ساخت صفحات مشبک کامپوزیتی با هندسه شش ضلعی از روش لایه‌گذاری‌دستی استفاده شد. رزین حاوی نانولوله‌های‌کربنی با سخت‌کننده در دمای محیط مخلوط گردید. در مرحله بعد الیاف کربن پیش آغشته شده با رزین به صورت لایه به لایه درون شیارهای قالب قرار داده شد و پس از آن لایه‌گذاری پوسته با استفاده از پارچه الیاف شیشه صورت پذیرفت. در ادامه، نمونه ساخته شده بین ۳-۲ ساعت در دمای محیط قرار داده شد تا عمل پخت رزین صورت گیرد و پس از آن نمونه از قالب جدا شد. در شکل ۲ صفحات مشبک کامپوزیتی ساخته شده، نمایش داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۲- صفحات مشبک کامپوزیتی، الف) فاقد نانولوله‌های‌کربنی چندجداره و ب) حاوی نانولوله‌های‌کربنی چندجداره

نمونه‌های ساخته شده دارای طول ۳۰۰ میلی‌متر و پهنای ۱۲۵ میلی‌متر بوده و ضخامت پوسته برابر با ۱/۸ میلی‌متر می‌باشد. مقطع ریب‌ها مربعی شکل با ابعاد ۶×۶ میلی‌متر مربع است. همچنین برای تمامی نمونه‌ها درصد حجمی الیاف کربن در ریب‌ها و الیاف شیشه در پوسته، به ترتیب برابر با ۳۰ و ۴۸ درصد می‌باشد.

۲-۵- آزمون ضربه سرعت بالا[3]

دستگاه ضربه با پیشرانه گازی متداول‌ترین دستگاه برای ارزیابی و مطالعه استحکام مواد تحت ضربه سرعت بالا به شمار می‌رود. در این نوع دستگاه، پرتابه با استفاده از هوای فشرده به سمت هدف پرتاب می‌شود. با تغییر فشار هوا، سرعت شلیک پرتابه تنظیم می‌شود. سرعت پرتابه با استفاده از مدت زمان قطع‌شدن اندازه‌گیری شده و با حسگر نوری محاسبه می‌شود. برای انجام آزمون ضربه سرعت بالا، دستگاه تفنگ‌گازی دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی استفاده شد که نمایی از آن در شکل ۳ نمایش داده شده است.

شکل ۳- نمای کلی از دستگاه ضربه سرعت بالای استفاده شده

شکل پرتابه در این پژوهش به صورت استوانه‌ای با دهانه مخروطی شکل[4] تعریف گردید تا تأثیر افزودن نانولوله‌های‌کربنی بر میزان تخریب و جذب انرژی صفحات مشبک کامپوزیتی در شکل پرتابه ثابت معین شود.

برخورد پرتابه به صفحات مشبک کامپوزیتی در سرعت ۱۰۷ متر بر ثانیه انجام گرفت و در هر آزمایش، سرعت‌های ورودی[5] و خروجی پرتابه[6] ثبت شدند. پرتابه مورد استفاده از جنس آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ با قطر ۲۱/۶۳ میلی‌متر، طول ۴ سانتی‌متر و وزن ۲۷ گرم جهت آزمون ضربه سرعت بالا مورد استفاده قرار گرفت. در شکل ۴ پرتابه مورد استفاده برای آزمون ضربه سرعت بالا نمایش داده شده است. جهت کسب اطمینان از نتایج آزمایش، هر آزمایش حداقل ۳ بار تکرار شد.

[1] Mechanical stirrer
[2] Ultrasonic wave

[3] High-velocity impact test
[4] Cone-shaped
[5] Initial velocity
[6] Residual velocity

www.SID.ir

Archive of SID

شکل ۴- پرتابه استوانه‌ای با دهانه مخروطی شکل

به منظور انجام آزمون ضربه سرعت بالا، ابعاد نمونه‌های مورد استفاده ۱۲۵×۱۵۰ میلی‌متر بودند. لذا نمونه‌های مشبک کامپوزیتی از وسط برش داده شدند. در شکل ۵ نمایی از نمونه مورد استفاده برای آزمون ضربه سرعت بالا در فیکسچر نمایش داده شده است.

شکل ۵- نمونه قرار داده شده در فیکسچر

برای بدست آوردن سرعت حد بالستیک[1] صفحه مشبک کامپوزیتی از رابطه (۱) استفاده شد.

$$V_b = \sqrt{V_i^2 - V_r^2} \qquad (۱)$$

در رابطه (۱)، V_b سرعت حد بالستیک، V_i سرعت ورودی و V_r سرعت خروجی پرتابه بعد از عبور از صفحه مشبک است. سرعت حد بالستیک یک پارامتر بسیار مهم در بررسی مقاومت به نفوذ اهداف می‌باشد و سرعتی است که اگر پرتابه با این سرعت به صورت قائم به هدفی برخورد نماید تا ۵۰ درصد احتمال نفوذ کامل[2] آن در هدف وجود دارد. انرژی جذب شده[3] طی فرآیند ضربه سرعت بالا را با توجه به رابطه (۲) می‌توان محاسبه نمود.

$$E_k = \frac{1}{2} m_p V_b^2 \qquad (۲)$$

1 Ballistic limit velocity
2 Penetration
3 Absorbed energy

که در رابطه (۲)، E_k، انرژی جذب شده و m_p، جرم پرتابه است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- حد بالستیک و انرژی جذب شده

خلاصه نتایج بدست آمده از آزمون ضربه سرعت بالای بر روی پوسته ساده کامپوزیتی و صفحات مشبک کامپوزیتی تقویت‌شده با نانولوله‌های‌کربنی چندجداره در جدول ۱ نشان داده شده است. هنگام برخورد پرتابه به پوسته کامپوزیتی ساده میزان انرژی جذب‌شده ۶۵/۹۸ ژول ثبت گردید. با تقویت پوسته کامپوزیتی توسط شبکه ریب‌های تک‌جهته میزان انرژی جذب‌شده کامپوزیت به میزان ۱۴ درصد افزایش یافت.

خصوصیات شبکه تعبیه شده در کامپوزیت مشبک باعث می‌شود که مسیر بارهای تخریبی در اطراف نقاط آسیب دیده تغییر یابد. در این حالت، در صورت ایجاد ترک در یک قسمت کامپوزیت به دلیل وجود فضای خالی در شبکه، این خرابی به قسمت‌های دیگر شبکه سرایت نمی‌کند که منجر به افزایش انرژی جذب شده می‌شود [۹]. از طرفی حضور ریب‌های تقویت شده با الیاف کربن تک‌جهته منجر به افزایش سفتی و استحکام کامپوزیت و در نتیجه، مقاومت در برابر تنش وارده ناشی از ضربه سرعت بالا می‌شود. در این شرایط، اشاعه ترک در قسمت‌های مختلف کامپوزیت با مشکل مواجه شده و افزایش تلرانس تخریب و جذب انرژی کامپوزیت را به همراه دارد.

جدول ۱- نتایج مربوط به آزمون ضربه سرعت بالا

نوع کامپوزیت	درصد وزنی نانولوله‌کربنی	سرعت ورودی (m/s)	سرعت خروجی (m/s)	حد بالستیک (m/s)	جذب انرژی (J)
پوسته ساده	۰	۱۰۷	۸۲	۶۸/۷۳	۶۳/۷۷
مشبک	۰	۱۰۷	۷۸	۷۳/۲۴	۷۲/۴۱
مشبک	۰/۱	۱۰۷	۷۷	۷۴/۲۹	۷۴/۵
مشبک	۰/۲۵	۱۰۷	۷۴	۷۷/۲۸	۸۰/۶۲
مشبک	۰/۴	۱۰۷	۷۰	۸۰/۹۲	۸۸/۳۹

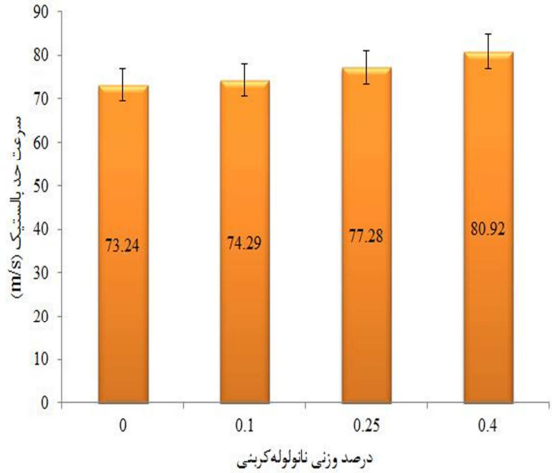
در شکل ۶ اثر افزودن نانولوله‌های‌کربنی بر خواص ضربه سرعت بالای صفحات مشبک کامپوزیتی نمایش داده شده است. سرعت حد بالستیک برای صفحات مشبک فاقد نانولوله‌های کربنی برابر با ۷۳/۲۴ متر بر ثانیه و به ازای افزودن ۰/۴ درصد وزنی نانولوله‌های‌کربنی سرعت حد بالستیک به مقدار ۸۰/۹۲ متر بر ثانیه افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده افزایش حد بالستیک به مقدار ۱۱ درصد است. همچنین میزان انرژی جذب شده برای صفحات فاقد نانولوله‌های‌کربنی و تقویت شده با ۰/۴ درصد وزنی نانولوله‌های‌کربنی به ترتیب برابر با ۷۲/۴۱ و ۸۸/۳۹ ژول گزارش گردیده است. در حقیقت به ازای افزودن ۰/۴

www.SID.ir

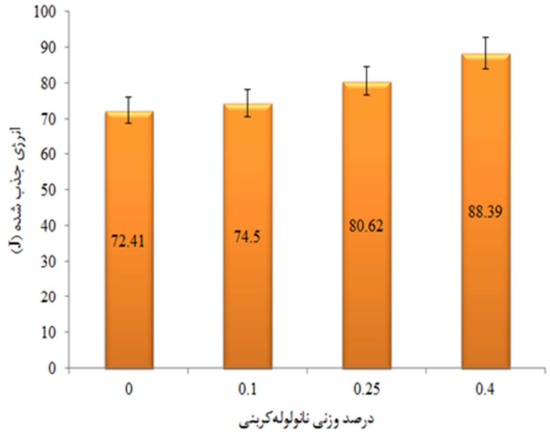
Archive of SID

درصد وزنی نانولوله‌های‌کربنی افزایش ۲۲ درصدی در انرژی جذب شده مشاهده می‌شود.

خواص ضربه سرعت بالا در مواد کامپوزیتی شدیداً وابسته به چقرمگی شکست، مدول الاستیک، استحکام کششی و کرنش شکست الیاف و زمینه، به علاوه فصل مشترک بین زمینه و الیاف، هستند. افزایش میزان انرژی جذب شده و سرعت حد بالستیک به ازای افزودن نانولوله‌های‌کربنی، ناشی از بهبود فصل مشترک بین زمینه و الیاف است[۱۷]. در کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف، فصل مشترک بین زمینه و الیاف از اهمیت بسزایی برخوردار است، زیرا بار اعمالی از طریق فصل مشترک به تقویت کننده الیافی انتقال می‌یابد. افزودن نانولوله‌های کربنی منجر به افزایش چسبندگی بین زمینه و الیاف می‌گردد. همچنین افزودن نانولوله‌های کربنی موجب محدود شدن جنبش و تحرک زنجیره‌های پلیمری هنگام بارگذاری می‌گردد که این موضوع سبب می‌شود انتقال بار از زمینه به الیاف به خوبی صورت پذیرد. بنابراین خواص ضربه سرعت بالای صفحات مشبک نانوکامپوزیتی بالاتر از صفحات مشبک فاقد نانولوله‌های کربنی است [۲۱-۲۳].



(الف)

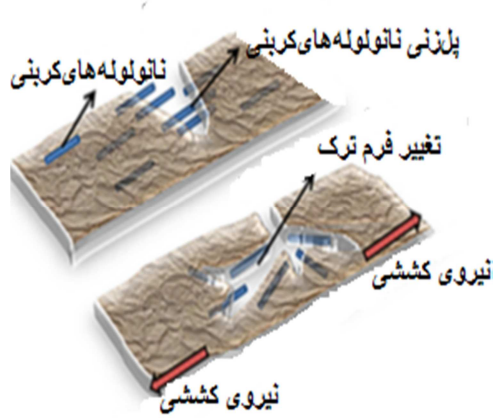


(ب)

شکل ۶- اثر افزودن نانولوله‌های‌کربنی بر الف) سرعت حد بالستیک و ب) انرژی جذب شده صفحات مشبک کامپوزیتی

نانولوله‌های کربنی با توجه به دارا بودن نسبت ابعادی[1] بالا از طریق مکانیزم پل‌زنی[2] مانع از باز شدن دهانه ترک می‌شوند. هنگامی که ترک در اثر بارگذاری ایجاد می‌شود، نانولوله‌های کربنی که درون زمینه پلیمری توزیع شده‌اند، به عنوان ذرات سخت و صلب مانع گسترش ترک می‌شوند که این موضوع باعث می‌شود، جوانه‌زنی و اشاعه ترک در امتداد فصل مشترک زمینه و الیاف سخت‌تر شود. چسبندگی مناسب نانولوله‌کربنی و پیوند قوی آنها با زمینه پلیمری منجر به افزایش انرژی لازم برای اشاعه ترک است که منجر به افزایش جذب انرژی صفحات مشبک کامپوزیتی حاوی نانولوله‌های کربنی می‌شود [۲۴-۲۶]. در شکل ۷ مکانیزم پل‌زنی نانولوله‌های‌کربنی که منجر به افزایش جذب انرژی می‌شود، نشان داده شده است.

یکی از نکات مهم در ضربه سرعت بالا، اصطکاک بین پرتابه و الیاف است. به طور کلی افزایش اصطکاک بین پرتابه و الیاف موجب افزایش انرژی لازم برای شکست الیاف شده که باعث افزایش جذب انرژی می‌شود [۲۷]. افزودن نانولوله‌های کربنی مقاومت به شکست را افزایش داده و تنش لازم برای گسیختگی الیاف[3] و همچنین انرژی لازم برای نفوذ پرتابه را افزایش می‌دهد. این موضوع، بهبود خواص ضربه سرعت بالای صفحات مشبک کامپوزیتی را به همراه دارد.



شکل ۷- طرحواره‌ای از مکانیزم پل‌زنی نانولوله‌های‌کربنی [۲۶]

۳-۲- بررسی سطح تخریب

هنگامی‌که یک صفحه مشبک کامپوزیتی تحت بارگذاری ضربه سرعت بالا قرار می‌گیرد، مکانیزم‌های تخریب که در ان ایجاد می‌شود. شامل پارگی الیاف، تورق[4] و ترک خوردن زمینه[5] و سوراخ شدن هدف[6] هستند. در حقیقت مکانیزم‌های مذکور، مهم‌ترین مکانیزم‌های جذب انرژی صفحات مشبک کامپوزیتی ناشی از ضربه سرعت بالا هستند [۲۸-۳۱]. پارگی الیاف ناشی از تنش کششی است که در آن کرنش اعمال شده به الیاف از کرنش نهایی در حالت کششی بیشتر است. ترک خوردن زمینه اولین حالت شکست در مواد کامپوزیتی محسوب می شود که ناشی از ترک خوردن زمینه در امتداد الیاف می باشد [۲۸].

1 Aspect ratio
2 Bridging
3 Fiber breakage
4 Delamination
5 Matrix cracking
6 Perforation

www.SID.ir

Archive of SID

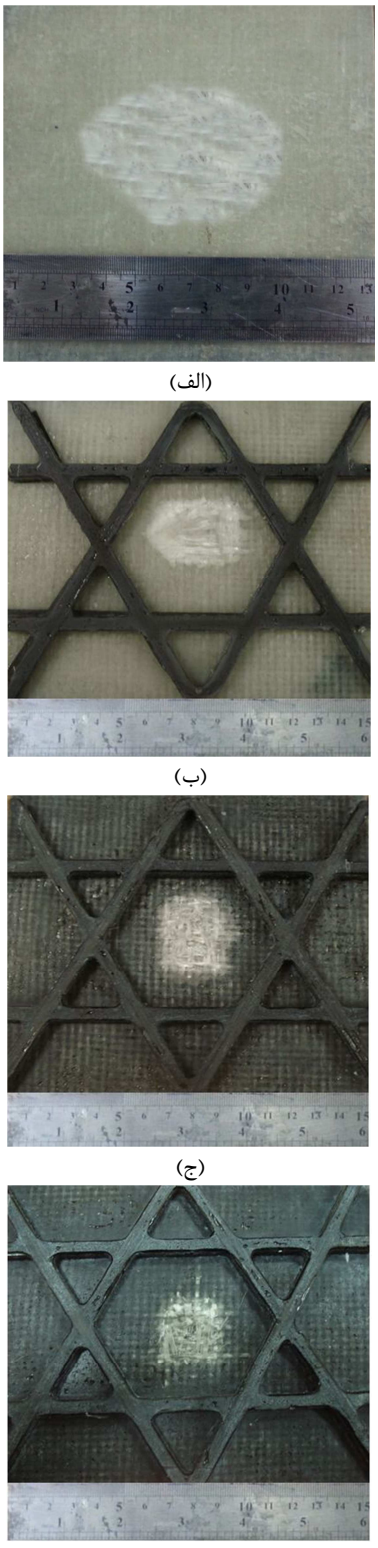
تورق و یا لایه‌لایه‌شدن یکی از مهم‌ترین مکانیزم‌های جذب انرژی در کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف می‌باشد که شامل جدایش لایه‌های مواد کامپوزیتی تحت بارگذاری به علت تنش‌های برشی بین لایه‌ای است که موجب اشاعه ترک در فصل مشترک الیاف و زمینه شده و در نتیجه لایه‌های کامپوزیتی از محل فصل مشترک دچار گسیختگی می‌شوند. لایه‌لایه شدن فصل مشترک در سازه‌های کامپوزیتی منجر به افت شدید ظرفیت تحمل بار آنها می‌شود [۲۹،۳۲].

سوراخ شدن هدف، حالت ماکروسکوپی شکست در ضربه سرعت بالا است. این حالت هنگامی رخ می‌دهد که پارگی الیاف ناشی از برخورد پرتابه به کامپوزیت به یک مقدار بحرانی برسد و در نتیجه پرتابه به طور کامل در کامپوزیت نفوذ می‌کند که منجر به ایجاد حفره و یا سوراخ در کامپوزیت می‌گردد [۳۱] .

در شکل ۸ سطح شکست پوسته کامپوزیتی ساده و صفحات مشبک کامپوزیتی تحت بارگذاری ضربه سرعت بالا، نمایش داده شده اند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، بعد از برخورد پرتابه به پوسته کامپوزیتی، تخریب در بخش وسیعی از صفحه کامپوزیتی ایجاد شده است. این در حالی است که در پوسته‌های کامپوزیتی تقویت شده با شبکه ریب‌ها به دلیل وجود ریب‌های با ساختار تک‌جهته سطح شکست محدود شده است. در حقیقت وجود ریب‌ها که دارای سفتی و استحکام بالایی هستند، مانع از گسترش ترک به قسمت‌های دیگر صفحات مشبک کامپوزیتی می‌شوند.

مطابق با شکل ۸، پس از برخورد پرتابه به صفحات مشبک کامپوزیتی ساختار ریب‌ها آسیب ندیده است. این امر ناشی از تک‌جهته بودن ساختار آنهاست که قابلیت جذب انرژی بالاتری تحت بارگذاری ضربه‌ای از خود نشان می‌دهند. از طرفی در هیچ کدام از صفحات مشبک کامپوزیتی جدایش شبکه ریب‌ها از پوسته مشاهده نگردید. به دلیل نازک بودن پوسته در سازه‌های مشبک کامپوزیتی، بیشتر بار اعمالی توسط ریب‌ها تحمل می‌شود لذا جدایش ریب‌ها از پوسته در حین بارگذاری تاثیر منفی بر عملکرد این سازه‌ها خواهد گذاشت [۲].

افزودن نانولوله‌های‌کربنی تاثیر بسزایی در سطح تخریب صفحات مشبک کامپوزیتی داشته‌اند. همان‌طور که در شکل ۸ (ب-د) نمایش داده شده است به ازای افزودن نانولوله‌های‌کربنی میزان سطح شکست در مقایسه با نمونه فاقد نانولوله‌های‌کربنی، به طور قابل توجهی کاهش یافته است. این موضوع به این دلیل است که نانولوله‌های‌کربنی به واسطه دارا بودن سفتی خمشی بالا، بیشتر انرژی وارده ناشی از برخورد پرتابه را به شکل تغییر شکل الاستیک جذب می‌نمایند. بنابراین مقدار انرژی مورد نیاز بیشتری برای ایجاد تخریب نیاز است که باعث کاهش سطح مقطع شکست می‌شود[۱۵]. از طرفی اصلی‌ترین مکانیزم شکست در کامپوزیت‌های لایه‌ای، تورق و یا لایه لایه شدن است. افزودن نانولوله‌های‌کربنی منجر به افزایش چقرمگی شکست کامپوزیت می‌شود و در نتیجه، مقاومت در برابر لایه‌لایه‌شدن کامپوزیت و شکست زمینه افزایش می‌یابد به همین دلیل است که پس از انجام آزمون ضربه سرعت بالا در صفحات مشبک کامپوزیتی حاوی نانولوله‌های کربنی میزان لایه‌لایه‌شدن در کامپوزیت کاهش یافته که در نتیجه منجر به کاهش سطح مقطع شکست می‌شود [۳۳].



(الف)

(ب)

(ج)

(د)

شکل ۸- سطح شکست الف) پوسته کامپوزیتی ساده ب)کامپوزیت مشبک فاقد نانولوله‌های‌کربنی، ج) کامپوزیت مشبک حاوی ۰/۲۵ درصد وزنی و د) کامپوزیت مشبک حاوی ۰/۴ درصد وزنی نانولوله‌های‌کربنی

۴- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، تأثیر افزودن نانولوله‌های‌کربنی چندجداره حاوی گروه‌های عاملی کربوکسیل در درصدهای وزنی مختلف (۰، ۰/۱، ۰/۲۵

www.SID.ir

Archive of SID

و ۰/۴) بر رفتار ضربه سرعت بالای صفحات مشبک کامپوزیتی با هندسه شش ضلعی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نهایی حاصل از این تحقیق به شرح زیر است:

۱- با مقایسه نتایج آزمون ضربه سرعت بالای پوسته کامپوزیتی ساده و پوسته کامپوزیتی تقویت شده با ریب‌ها مشخص شد که حضور شبکه ریب‌های تک‌جهته منجر به محدود نمودن سطح شکست و افزایش جذب انرژی و تلرانس تخریب کامپوزیت می‌شود.

۲- به ازای افزودن ۰/۴ درصد وزنی نانولوله‌های‌کربنی، سرعت حد بالستیک و میزان انرژی جذب شده صفحات مشبک کامپوزیتی تقویت‌شده با نانولوله‌های‌کربنی چندجداره طی فرآیند ضربه سرعت بالا، به ترتیب به میزان ۱۱ و ۲۲ درصد نسبت به صفحات مشبک کامپوزیتی فاقد نانولوله‌های‌کربنی، افزایش یافت.

۳- بهبود در رفتار ضربه سرعت بالای صفحات مشبک کامپوزیتی به ازای افزودن نانولوله‌های‌کربنی ناشی از بهبود فصل مشترک زمینه و الیاف است که باعث می‌شود انتقال بار موثر از زمینه به الیاف به خوبی صورت پذیرد.

۴- در هیچ یک از صفحات مشبک کامپوزیتی شبکه ریب‌ها آسیب ندید. همچنین پدیده جدایش ریب‌ها از پوسته کامپوزیت مشبک پس از آزمون ضربه سرعت بالا بر روی این صفحات مشاهده نشد.

۵- با افزودن نانولوله‌های کربنی به زمینه کامپوزیت، سطح تخریب ایجاد شده در صفحات مشبک کامپوزیتی ناشی از ضربه سرعت بالای پرتابه مخروطی شکل، نسبت به صفحات مشبک کامپوزیتی فاقد نانولوله‌های کربنی کاهش یافت.

۶- در مجموع، نتایج بدست آمده از این تحقیق نشان داد که افزودن نانولوله‌های کربنی به عنوان تقویت‌کننده نانومتری تاثیر قابل توجهی بر بهبود خواص ضربه سرعت بالای صفحات مشبک کامپوزیتی دارد.

۵- مراجع

[1] Soutis C., Carbon fiber reinforced plastics in aircraft construction, Materials Science and Engineering, Vol. 412, pp. 171-176, 2005.

[2] Vasiliev V. V., and Razin A. F., Anisogrid composite lattice structures for spacecraft and aircraft applications, Composite Structures, Vol. 76, pp. 182–189, 2006.

[3] Vasiliev V. V., Barynin V. A., and Razin A. F., Anisogrid composite lattice structures Development and aerospace applications, Composite Structures, Vol. 94, pp. 1117–1127, 2012.

[4] Vasiliev V. V., Barynin V. A., and Razin A. F., Anisogrid lattice structures- survey of development and application, Composite Structures, Vol. 54, pp. 361-370, 2001.

[۵] میرزاآقایی علی، ملک‌زاده کرامت، اسکندری‌جم جعفر، خودکفایی در صنعت مشبک‌های کامپوزیتی در صنعت نفت، ماهنامه اکتشاف و تولید، شماره ۸۹، صفحه ۴۳، اردیبهشت ۱۳۹۱.

[6] Hedayatian, M. Liaghat, G. H. Rahimi, G. H. and Pol M. H., Numerical and experimental analyses projectile penetration in grid cylindrical composite structures under high velocity Impact, Modarres Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 9, pp. 17-26, 2014.

[7] Totaro G., Local buckling modelling of isogrid and anisogrid lattice cylindrical shells with hexagonal cells, Composite Structures, Vol. 95, pp. 403–410, 2013.

[8] Morozov E. V., Lopatin A. V., and Nesterov V. A., Finite-element modelling and buckling analysis of anisogrid composite lattice cylindrical shells, Composite Structures, Vol. 93, pp. 308–321, 2013.

[9] Lim K., He W., and Guan Z., Buckling Analysis of Advanced Grid Stiffened Composite Cylinders, Advanced Materials Research, Vol. 855-857, pp. 755-762, 2014.

[10] Buragohain M., and Velmurugan R., Optimal design of filament wound grid-stiffened composite cylindrical structures, Defence science journal, Vol. 61, pp. 88-94, 2011.

[11] Hemmatnezhad M., Rahimi G. H., Tajik M., and Pellicano F., Experimental, numerical and analytical investigation of free vibrational behavior of GFRP-stiffened composite cylindrical shells, Composite Structures, Vol. 120, pp. 509–518, 2015.

[12] Wodesenbet E., Kidane S., Pang S. S., Optimization for buckling loads of grid stiffened composite panels, Composite Structures, Vol. 60, PP. 159-169, 2003.

[13] Pandya K. S., Akella K., Joshi M., and Naik N. K., Ballistic impact behavior of carbon nanotube and nanosilica dispersed resin and composites, Journal of Applied Physics, Vol. 112, pp. 1-6, 2012.

[14] Velmuruga R., and Balaganesan G., Energy absorption characteristics of glass/epoxy nano composite laminates by impact loading, International Journal of Crashworthiness, Vol. 18, pp. 82-92, 2013.

[15] Rahman M., Hosur M., Zainuddin S., Vaidya U., Tauhid A., Kumar A., Trovillion J., and Jeelani S., Effects of amino-functionalized MWCNTs on ballistic impact performance of E-glass/epoxy composites using a spherical projectile, International Journal of Impact Engineering, Vol. 57, pp. 108-118, 2013.

[16] Laurenzi S., Pastore R., Giannini G., and Marchetti M., Experimental study of impact resistance in multi-walled carbon nanotube reinforced epoxy, Composite Structures, Vol. 99, pp. 62–68, 2013.

[17] Pol M. H., Liaghat G. H., and F. Hajiarazi, Effect of nanoclay on ballistic behavior of woven fabric composites: Experimental investigation, Journal of Composite Materials, Vol. 47, pp. 1563-1573, 2012.

[18] Boddu V. M., Brenner M. W., Patel J. S., Kumar A., Mantena P. R., Tadepalli T., and Pramanik B., Energy dissipation and high-strain rate dynamic response of E-glass fiber composites with anchored carbon nanotubes, Composites, Part B, Vol. 88, pp. 44-54, 2016.

[19] Gibson J., McKee J., Freihofer G., Raghavan S., and Gou J., Enhancement in ballistic performance of composite hard armor through carbon nanotubes, International Journal of Smart, and Nano Materials, Vol. 4, pp. 212-228, 2013.

[20] Gibson S. L., Gordaninejad R. F., and Suhr F. J, Energy Absorption Capability of Nanocomposites: A Review, Composites Science and Technology, Vol. 69, pp. 2392-2409, 2009.

[21] Micheli D., Vricella A., Pastore R., Delfini A., Giusti A., Albano M., Marchetti M., Moglie F., and Primiani M. V., Ballistic and electromagnetic shielding behavior of multifunctional Kevlar fiber reinforced epoxy composites modified by carbon nanotubes, Carbon, Vol. 104, pp. 141-156, 2016.

[22] Seyhan T. A., Tanoglu M., and 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, Vol. 75, pp. 5151-5162, 2008.

[23] Zhang J., Jua S., Jiang D., and Peng H. X., Reducing dispersity of Mechanical Properties of Carbon Fiber/ Epoxy Composites by Introducing Multi-Walled Carbon Nanotube, Composites, Part B, Vol. 54, pp. 371-376. 2013.

[24] Garg M. S., and Mehta R., Pristine and Amino functionalized Carbon Nanotubes Reinforced Glass Fiber Epoxy Composites, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 76, pp. 92–101, 2015.

[25] Rahman M. M., Hosur M., Zainuddin S., Jeelani S., High Velocity Impact Response of E-glass/epoxy Composites Modified with NH_2-MWCNT, Proceeding of the 19TH International Conference on Composite Materials, Montreal, Canada, 2013.

[26] Feng Y., Wang K., Davies C. H. J., and Wang H., Carbon Nanotube/ Alumina/ Polyethersulfone Hybrid Hollow Fiber Membranes with Enhanced Mechanical and Anti-Fouling Properties, Nanomaterials, Vol. 5, PP. 1366-1378, 2015.

www.SID.ir

Archive of SID

[27] Dimeski D., Srebrenkoska V., and Mirceska N., Ballistic Impact Resistance Mechanism of Woven Fabrics and their Composites, International Journal of Engineering Research and Technology, Vol. 4, PP. 107-111, 2015.
[28] Razali N., Sultan M. T. H., Mustapha F., Yirdis N., and Ishak M. R., Impact Damage on Composite Structures– A Review, The International Journal of Engineering and Science, Vol. 3, pp. 8-20, 2014.
[29] Nair N. S. S., Kumar C. V. V, Naik N. K. K., and Shaktivesh S., Ballistic impact performance of composite targets, Materials and Design, Vol. 51, pp. 833– 846, 2013.
[30] Naik N. K., Shrirao P., and Reddy B. C. K., Ballistic impact behavior of woven fabric composites: Formulation, International Journal of Impact Engineering, Vol. 32, pp. 1521-1552, 2006.
[31] Udatha P., Kumar C. V. S., Nair S. N., and Naik N. K., High velocity impact performance of three-dimensional woven composites, The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, Vol. 47, pp. 419-431, 2012.
[32] Dogan F., Hadavinia H., Donchev T., Bhong P. S., Delamination of impacted composite structures by cohesive zone interface elements and tiebreak contact, Central European Journal of Engineering, Vol. 2, pp. 612-626, 2012.
[33] Rahman M. M., Hosur M., Zainuddin S., Jeelani S., High velocity impact response of E glass/epoxy composites modified with NH_2- MWCNT, 19^{TH} International Conferenece on Composite Materials, Montreal, Canada, 2013.

www.SID.ir