مجله مهندسی مکانیک مدرس، آبان 1396، دوره 17، شماره 8، ص‌ص 126-132

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی تجربی خواص بالستیکی هیبرید آلومینیوم و نانوکامپوزیت زمینه اپوکسی تقویت شده با نانو لوله کربنی

مجید خوانساری[1]، حسین خدارحمی[*2]، سید عباس وزیری‌یزدی[3]

1- کارشناس‌ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین، تهران
2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین، تهران
3- استادیار، مهندسی مواد، دانشگاه جامع امام حسین، تهران
* تهران، صندوق پستی 169871546، hkhdrhmi@ihu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 19 اسفند 1395
پذیرش: 10 تیر 1396
ارائه در سایت: 18 مرداد 1396

کلید واژگان:
هیبرید
نانولوله کربنی
نانوکامپوزیت
کولار
سرعت حد بالستیک

چکیده

یکی از روش‌های جدید که به تازگی مورد توجه محققان قرارگرفته استفاده از نانوذرات برای تقویت کامپوزیت‌هاست که در عین حال در وزن سازه تغییری ایجاد نمی‌کند خواص مکانیکی و فیزیکی آن را بهبود می‌بخشد. نانولوله کربنی یکی از این مواد است که از زمان کشف آن تاکنون کاربرد گسترده‌ای در صنعت پیدا کرده است. در این مقاله پاسخ پنل‌های هیبرید آلومینیوم و کامپوزیت ساخته شده از اپوکسی و کولار و پنل‌های هیبرید آلومینیوم و نانوکامپوزیت اپوکسی و کولار در اثر ضربه بالستیک مورد بررسی قرار گرفت. چهار گروه از پنل‌های بالا با درصدهای 0، 0.5، 1 و 1.5 نانولوله کربنی ساخته شد. نمونه‌های هیبریدی که در این تحقیق ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفته، با روش لایه‌چینی دستی و پرس گرم انجام شده است. ضخامت پنل‌های فوق که متشکل از دو صفحه آلومینیومی و ده صفحه کولار 29 و ثابت بود. آزمون‌های ضربه بالستیک با استفاده از پرتاب گلوله مخروطی 7.6 گرمی و با دو سرعت میانگین220 و 275 متر بر ثانیه توسط تفنگ گازی انجام شد. سرعت ورودی و خروجی در هریک از نمونه‌ها به وسیله سرعت‌سنج لیزری مشخص شد. مقدار جذب انرژی و جذب انرژی ویژه عبور پرتابه به عنوان معیاری برای مقایسه کارایی بالستیک پنل‌های مختلف تعیین شد. نتایج نشان داد از میان چهار نمونه مورد بررسی، پنل حاوی 1% نانولوله کربنی بیشترین جذب انرژی و مقاومت بالستیکی را داراست.

Experimental study of ballistic properties of hybrid aluminum and epoxy matrix composite reinforced with carbon nanotube

Majid Khansari[1], Hossein Khodarahmi[1*], Abas Vaziri[2]

1- Department of Mechanical Engineering, Emam Hossein University, Tehran, Iran
2- Department of Materials Engineering, Emam Hossein University, Tehran, Iran
* P.O.B. 169871546 Tehran, Iran, hkhdrhmi@ihu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 09 March 2017
Accepted 01 July 2017
Available Online 09 August 2017

Keywords:
Hybrid
CNT
Nano-composite
Kevlar
Ballistic limit velocity

ABSTRACT

One of the recent techniques which have attracted attention from researchers is the use of Nano particles to reinforce composites. While the technique does not make any changes in the weight of the structure, it improves its mechanical and physical properties. One form of Nano particles includes Carbonic Nano Tubes (CNT). Since its discovery, CNT has found wide application in industry. In this article, the response of aluminum hybrid panels and composites made from epoxy-Kevlar and aluminum hybrid panels and Nano-composites made from epoxy-Kevlar to ballistic impact was studied. Four groups of the panels were constructed using 0, 0.5, 1 and 1.5 percent of carbon nanotubes (CNTs). The hybrid samples constructed and tried out in this experiment were done using manual layer-making and heated press.The thickness of the panels constructed from two aluminum plates and ten Kevlar 29 plates was consistent. The ballistic impact test using gas gun was implemented by conical bullet 7.6 gr shooting in two average velocities (220 m/s and 275 m/s). Input and output velocity with each sample was assessed using a laser speedometer. The amount of energy absorption and special energy absorption of the passing of the rocket was determined as the criteria for comparison of the efficiency of the ballistics of different panels. The results indicated that among the four samples examined, the panel made up of 1 percent CNTs had the most energy absorption and ballistic resistance.

1- مقدمه

برای بهبود خواصی چون دانسیته پایین، مدول الاستیسیته بالا، چقرمگی بالا، مقاومت به خوردگی بالا، مقاومت در برابر خستگی و مقاومت به ضربه و نفوذ بالا می‌توان از کامپوزیت‌های هیبریدی استفاده کرد. کامپوزیت‌های هیبریدی از جدیدترین نوع مواد کامپوزیتی در حال توسعه است. کامپوزیت‌های هیبریدی به موادی گفته می‌شوند که بیش از یک نوع فاز تقویت‌کننده، بیش از یک نوع زمینه یا از هردو حالت تشکیل شده باشند. در کامپوزیت‌های هیبریدی ترکیبات متفاوتی از صفحات یکپارچه یا فویل‌ها و یا ترکیبی از

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Khansari, H. Khodarahmi, A. Vaziri, Experimental study of ballistic properties of hybrid aluminum and epoxy matrix composite reinforced with carbon nanotube, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 8, pp. 126-132, 2017 (in Persian)

صفحات یا فویل‌ها به همراه کامپوزیت‌های الیافی در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند. کامپوزیت‌های هیبریدی هم از لحاظ اقتصادی و هم از لحاظ فنی بر دیگر کامپوزیت‌ها ارجحیت دارند. امکان تولید ترکیبات بسیار متنوع با گستره وسیعی از خواص و با قیمت کم در کامپوزیت‌های هیبریدی وجود دارد.

دلیل استفاده وسیع از این مواد دارا بودن خواص مکانیکی کلی لایه‌های سازه است که از خواص مواد تشکیل‌دهنده آن سرچشمه می‌گیرد. برای نمونه جهت افزایش بازدهی اتومبیل و هواپیما و نیز کاهش مصرف سوخت و گازهای خروجی می‌توان با انتخاب مواد مناسب علاوه‌بر کاهش وزن، قابلیت اطمینان را نیز در این وسایل بالا برد [1]. بدین منظور تلاش زیادی صورت گرفت تا اجزای بدنه اتومبیل‌ها را به جای ورق‌های فولادی از آلیاژهای آلومینیوم سازند. از پلیمر نیز به این دلیل استفاده شد که وزن به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش یابد و در مقابل هیچ کاهشی در مقاومت و سختی، خواص مکانیکی خاص از قبیل ضربه‌پذیری، خاصیت عایق حرارتی و میراگر صوتی، حفاظت از خوردگی و غیره رخ ندهد [3,2].

ساختار لایه‌های این مواد که ترکیبی از فلز و کامپوزیت است سبب شده که کامپوزیت‌های هیبریدی یا چندلایه‌های الیافی فلزی، بسیاری از مزیت‌های فلزات و کامپوزیت‌ها را در خود جمع کند، مزیت‌هایی نظیر چگالی پایین و استحکام بالا از آن جمله است.

چند لایه‌ای الیافی فلزی، بسته به نوع فلز (آلومینیوم، تیتانیوم، منیزیم و...) یا الیاف کامپوزیت (الیاف شیشه، کولار، کربن و...)که در ساختار آن استفاده شده، می‌تواند انواع مختلفی داشته باشد. در حال حاضر الیاف آرال که شامل فلز آلومینیوم و الیاف کولار است یکی از معروف‌ترین این کامپوزیت‌هاست که در صنایع هوایی و نظامی کاربرد فراوان دارند [4].

آسیب ضربه یکی از آسیب‌های مرتبط با سازه‌های هوایی و زره‌های نظامی است که احتمال وقوع آن به صورت ضربه‌های کم سرعت یا پرسرعت وجود دارد. پارامتر وزن یکی از مهم‌ترین پارامترها در طراحی و ساخت سازه‌های فضایی و زره‌ها و سپرهای نظامی است و طراحان همواره به دنبال ساخت وسایلی هستند که با وجود استحکام بالا، وزن و چگالی پایین‌تر و در نتیجه جذب انرژی بالاتری داشته باشد.

در طول سه دهه اخیر مطالعات زیادی روی مواد مرکب که می‌توانند جایگزین آلیاژهای آلومینیوم درصنایع هوافضا شوند، انجام شده است. برای طراحی بهینه این مواد باید ترکیبی از خواصی چون مقاومت بالا به ضربه و نفوذ، دانسیته پایین، مدول الاستیسیته بالا، چقرمگی بالا، مقاومت به خوردگی بالا و مقاوم در مقابل خستگی را دارا باشد.

احمدی و همکارانش [6,5] اثر تغییر ضخامت لایه‌های آلومینیومی را در فلز- مواد مرکب شیشه اپوکسی بررسی کردند. نتایج نشان داد که هرچه ضخامت ورق‌های آلومینیوم کمتر باشد انرژی مخصوص نفوذ (انرژی جنبشی متناظر با حد سرعت بالستیک بر چگالی سطحی) بیشتر می‌شود، همچنین آن‌ها بیان کردند در سرعت‌های نزدیک حد بالستیک میزان تأثیرگذاری آلومینیوم وسطی در آرایش 3/2 بیشتر از لایه‌های آلومینیوم رویی است. نخستین کار تحلیلی بر فلز- مواد مرکب شیشه اپوکسی را میشل هوفت[1] و همکارانش [7] با استفاده از روش بالانس انرژی انجام دادند. آن‌ها میزان جذب انرژی در فلز- مواد مرکب شیشه اپوکسی را با استفاده از روش تحلیلی به دست آوردند. صبوری و همکارانش [8] اثر لایه‌چینی را در فلز- مواد مرکب شیشه اپوکسی به صورت عددی و تجربی بررسی کردند. نتایج تخمین حد بالستیک با استفاده از روش تجربی و عددی بود.

طی سالیان گذشته راه‌حل‌ها و تکنیک‌های مختلفی برای بهبود نواقص موجود ارائه شده و برخی از آن‌ها نیز مفید واقع شده‌اند، اما کلید حل بیشتر این مشکلات در دست جدیدترین یافته بشر، یعنی نانوفناوری قرار دارد.

نانوکامپوزیت نیز همان کامپوزیت است که یک یا چند جزء از آن، ابعاد کمتر از 100 نانومتر دارد. نانوکامپوزیت‌ها از دو فاز تشکیل شده‌اند. فاز اول یک ساختار بلوری است که در واقع پایه یا زمینه[2] نانوکامپوزیت محسوب می‌شود و ممکن است از جنس پلیمر، فلز و یا سرامیک باشد. فاز دوم نیز ذراتی در مقیاس نانومتر است که به عنوان تقویت‌کننده یا مواد پرکننده[3] به منظور اهداف خاص از قبیل استحکام، مقاومت، هدایت الکتریکی، خواص مغناطیسی و... در درون فاز اول (ماده زمینه) توزیع می‌شوند. در بحث نانومواد، نانوکامپوزیت‌ها از جایگاه ویژه‌ای برخوردار هستند. حضور ذرات و الیاف در ساختار نانوکامپوزیت‌ها معمولاً سبب ایجاد استحکام در ماده پایه می‌شود. در واقع هنگامی که ذرات و یا الیاف درون یک ماده پایه توزیع شوند، نیروهای اعمال شده به کامپوزیت به طور یکنواختی به ذرات یا الیاف منتقل می‌شود. با توزیع مواد پرکننده درون ماده پایه خصوصیاتی نظیر استحکام، سختی، خواص تربیولوژیکی و تخلخل تغییر می‌کند. ماده پایه می‌تواند ذرات را به گونه‌ای از هم جدا نگه دارد که رشد ترک به تأخیر افتد، همچنین اجزاء نانوکامپوزیت‌ها بر اثر برهمکنش سطحی بین ماده پایه و مواد پرکننده، از خواص بهتری برخوردار می‌شوند. نوع و میزان برهمکنش‌ها نقش مهمی در خواص مختلف نانوکامپوزیت‌ها چون حلالیت، خواص نوری، خواص الکتریکی و مکانیکی آن‌ها دارد [9].

در بین نانوکامپوزیت‌ها بیشترین توجه به نانوکامپوزیت‌های پایه پلیمری معطوف است. یکی از دلایل گسترش نانوکامپوزیت‌های پلیمری، خواص بی‌نظیر مکانیکی، شیمیایی و فیزیکی آن است. نانوکامپوزیت‌های پلیمری عموماً دارای استحکام بالا، وزن کم، پایداری حرارتی بالا، رسانایی الکتریکی بالا و مقاومت شیمیایی بالایی است. نانو کامپوزیت‌های زمینه پلیمری، پتانسیلی برای بهبود هم‌زمان از چندین خواص از جمله چقرمگی ارائه می‌کنند [10].

در نانوکامپوزیت‌ها تقویت‌کننده‌ها ذراتی در ابعاد نانومتر است. با افزودن درصد کمی از نانوذرات به یک پلیمر خالص، استحکام کششی، استحکام تسلیم و مدول یانگ افزایش چشم‌گیری می‌یابد. عوامل مؤثر بر خواص نانوکامپوزیت‌ها شامل پراکندگی نانویی، ابعاد، کسر حجمی، ماهیت زمینه، ویژگی‌های بین لایه‌ای بین پرکننده‌های نانویی و زمینه و فرایند تولید است. در حال حاضر بسیاری از نتایج تحقیقات جذب انرژی در کامپوزیت‌ها، به آزمایش‌ها و پارامترهای مختلف طراحی مانند نوع پرکننده، اندازه یا کسر حجمی بستگی دارد [12,11].

پل و همکارانش [13] تأثیر نانو ذرات کلوسید سی‌بی[4] را بر خواص مکانیکی و بالستیکی مواد مرکب هیبریدی شیشه/ اپوکسی ساخته شده با روش تزریق به کمک خلأ بررسی کردند. حاصل کار آن‌ها نشان‌دهنده این بود که بیشترین افزایش خواص بالستیکی در سرعت برخورد نزدیک حد بالستیک در 5% وزنی نانورس و در سرعت‌های به نسبت بالاتر در بیش از 7% وزنی به دست می‌آید، همچنین پل و همکارانش [14] تأثیر نانوذرات رسی بر خواص بالستیکی مواد مرکب شیشه/ اپوکسی را بررسی کردند. نتایج نشان داد حالت

[1] M.S.Hoofatt

[2] matrix
[3] filler
[4] Closite 30B

بهینه افزایش خواص بالستیکی در 3% وزنی نانورس به مقدار 10% نسبت به نمونه‌های خالص است. لیاقت و همکارانش [15] تأثیر نانورس بر خواص بالستیکی فلز/ مواد مرکب شیشه اپوکسی را به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار دادند. فلز/ مواد مرکب شیشه اپوکسی ساخته شده، از دو رویه آلومینیومی 2024 و هسته نانوکامپوزیتی شیشه/ اپوکسی/ نانورس تشکیل شده بود. نتایج حاصل از آزمایش‌های بالستیکی نشان‌دهنده این بود که میزان تغییرات جذب انرژی مخصوص در 4% وزنی ناچیز بوده است و لیکن در 7% و 10% وزنی، میزان جذب انرژی مخصوص افزایش می‌یابد. در واقع نانورس تحت برخورد بالستیک در درصدهای بالا تأثیرگذار است.

کشف نانولوله‌های کربنی چند دیواره در سال 1991 موجب شده است که فعالیت‌های تحقیقاتی گسترده‌ای در علوم به بحث نانوساختارهای کربنی و کاربردهای آن‌ها اختصاص یابد. مهم‌ترین فاکتوری که سبب برگزیدن نانولوله به عنوان تقویت‌کننده در مواد مرکب (کامپوزیت) شده وزن کم آن است، در حالی که استحکام آن بالاست. برای نمونه نیروی لازم برای شکستن یک نانولوله کربنی چند برابر نیرویی است که برای شکستن یک قطعه فولاد با ضخامتی معادل یک نانو لوله احتیاج داریم.

اسلام سلیمان[1] و همکارانش [16] کامپوزیت‌های تقویت شده با نانولوله‌های کربنی را تحت آزمایش سقوط وزنه قرار دادند و بیشترین جذب انرژی را در 1.5% به دست آوردند. خوش‌گفتار و همکارانش [17] به بررسی تأثیر افزودن نانولوله کربنی بر کامپوزیت‌های پلیمری با الیاف بافته شده شیشه پرداختند. نتایج نشان می‌داد بیشترین افزایش استحکام تنش تسلیم به ازای 0.5% نانولوله کربنی و بیشترین افزایش جذب انرژی نفوذ پرتابه سرکروی به ازای 1.5% اتفاق افتاده است. لورنزی[2] و همکارانش [18] صفحات کامپوزیتی کولار/ اپوکسی تقویت شده با نانو لوله کربنی چند دیواره را از نظر قابلیت جذب انرژی به وسیله آزمون شارپی مورد آزمایش قرار دادند. نتایج نشان داد چقرمگی صفحات کامپوزیتی در 0.5% نانولوله کربنی بیشترین جذب انرژی را داشته است. آن‌ها دو صفحه کامپوزیتی کولار/ اپوکسی فاقد نانولوله کربنی چند دیواره و دیگری تقویت شده با نانولوله کربنی چند دیواره را در سرعت‌های بالا مورد آزمایش قرار دادند و نتیجه گرفتند جذب انرژی در صفحات تقویت شده بهبود یافته است.

این مقاله به بررسی خواص بالستیکی پنل‌های ساخته شده هیبرید آلومینیوم و نانو کامپوزیت زمینه اپوکسی تقویت شده با درصدهای مختلف نانولوله کربنی می‌پردازد. بررسی مکانیزم‌های مختلف تخریب در ضربه بالستیک و ظرفیت جذب انرژی پنل‌های مختلف به منظور تعیین بهترین پنل با بیشترین سرعت حد بالستیک مورد نظر است.

2- ساخت نمونه‌ها و مشخصات آن‌ها

برای شروع کار ابتدا پودر نانولوله کربنی چند دیواره ساخت کشور آمریکا با مشخصات خلوص بیش از 95% و قطر خارجی 20-30 نانومتر و قطر داخلی 5-10 نانومتر به مدت 24 ساعت در دمای 80 درجه سانتی‌گراد در آون قرار گرفت تا به طور کامل رطوبت‌زدایی شود. سپس با توجه به درصد وزنی نانولوله مورد آزمایش، مقدار آن به رزین افزوده شد و به مدت یک ساعت با دور 3000rpm مخلوط شد. پس از آن مخلوط رزین و نانولوله به مدت نیم ساعت در همزن آلتراسونیک برای جلوگیری از تجمع ذرات قرار داده شد و دوباره برای تکمیل فرآیند پخش نانوذره در رزین، همزن به مدت یک ساعت با دور rpm3000 رزین و نانولوله‌کربنی را مخلوط کرد. در ادامه مخلوط در آون خلأ جهت حباب‌زدایی قرار داده شد. سپس 50% سخت‌کننده به مخلوط اضافه و مخلوط آماده استفاده در لایه‌چینی دستی شد. رزین به کاررفته، اپوکسی CY219 ساخت شرکت هانتسمن آلمان و سخت‌کننده با نام تجاری HY5160 است که به نسبت 2 به 1 مخلوط می‌شود. ورق‌های فلزی مورد استفاده از جنس آلومینیوم آلیاژی گروه 2024-T3 با ضخامت 0.032 اینچ یا 0.8 میلی‌متر است. الیاف کولار از نوع کولار 29 ساخت کشور ایتالیا به صورت پارچه دوجهته و با چگالی $1400\ kg/m^3$ انتخاب شد. کولار 29 با توجه به استحکام بالای آن مخصوص استفاده در ضربه‌های بالستیکی است. آماده‌سازی سطحی ورق‌های آلومینیوم، طبق استاندارد ASTM2651 انجام شد [19]. تولید نمونه‌ها در آزمایشگاه مکانیک ضربه و انفجار دانشگاه جامع امام حسین[4] به روش آماده‌سازی دستی و با کمک پرس‌گرم مجهز به سیستم کنترل فشار انجام شد. برای ساخت نمونه‌ها ابتدا فویل آلومینیومی به واکس جداکننده آغشته شد. سپس قاب فلزی به ضخامت 3 میلی‌متر بر آن قرار داده شد و لایه‌چینی در داخل قاب فلزی انجام گرفت. در شکل 1 یکی از مراحل انجام لایه‌چینی دستی به تصویر کشیده شده است.

در انتها فویل آلومینیومی بر قاب کشیده و در داخل دستگاه پرس گرم گذاشته شد. شکل 2 تصویر شماتیکی از پنل هیبرید آلومینیوم و نانوکامپوزیت کولار/ اپوکسی که شامل ده لایه کولار دوجهته و دولایه آلومینیوم 2024-T3 درطرفین الیاف پارچه‌ای کولار است را نشان می‌دهد.

پنل‌های ساخته شده به مدت 50 دقیقه تحت فشار 2bar و دمای 80^0C قرار داده شدند تا عملیات پخت کامل شود. ضخامت تمام نمونه‌ها 3mm است. پشت و روی لایه‌های کامپوزیت، با صفحات آلومینیوم هیبرید گردید. در شکل 3 نمونه‌هایی از پنل‌های ساخته شده نشان داده شده است.

برای پرتاب گلوله به سمت هدف از سابوت استفاده می‌شود. سابوت در واقع نقش پوکه برای گلوله را دارد. برای ساخت سابوت از قالب‌های سیلیکونی استفاده شد. برای این کار ابتدا 4 عدد سابوت که به وسیله دستگاه تراش و با

Fig. 1 Padding-hand samples of hybrid nano composites kevlar/ epoxy and aluminum

شکل 1 لایه‌چینی دستی نمونه‌های نانوکامپوزیت هیبرید آلومینیوم

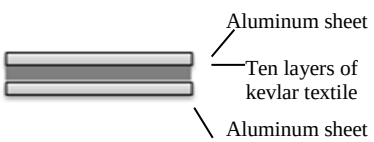

Fig. 2 Panel schematic image of hybrid nano composites kevlar/epoxy and aluminum

شکل 2 تصویر شماتیک پنل هیبرید نانوکامپوزیت کولار/ اپوکسی وآلومینیوم

[1] E. M. Soliman
[2] S. Laurenzi

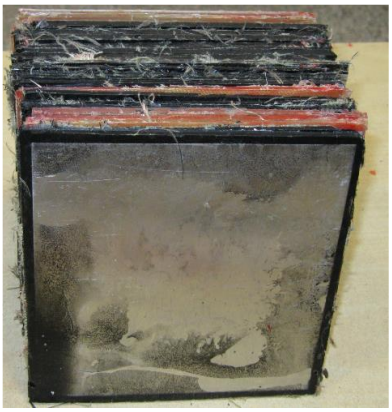

Fig. 3 Made samples with different percentages of carbon nanotubes

شکل 3 نمونه‌های ساخته شده با درصدهای مختلف نانولوله کربنی

هزینه زیاد ساخته شده بود، در درون ظرف قالب با چسب قطره‌ای ثابت شد.سپس مخلوط سیلیکون و هاردنر به نسبت 100 به 5 در درون ظرف تا در برگرفتن نمونه‌ها ریخته شد و بعد از مدت 3 ساعت سیلیکون سخت شد و قالب‌ها شکل گرفت. بعد ظرف قالب را وارونه کرده و نمونه‌های اصلی از ظرف قالب جدا می‌شوند. در این‌جا قالب سابوت ساخته شده است. سپس با رزین اپوکسی قالب‌ها پر شده و به مدت 24 ساعت در معرض هوای محیط قرار می‌گیرد. بعد از این مدت نمونه‌های ساخته شده از قالب بیرون آورده می‌شود. با این عمل هزینه ساخت سابوت به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. شکل 4 مراحل ساخت سابوت گلوله را نشان می‌دهد.

در جدول 1 پنل‌های ساخته شده با توجه به درصد نانولوله‌کربنی به کار رفته در آن معرفی شده است. نمونه‌های A1 تا D1 مربوط به انجام تست در فشار 20bar و نمونه‌های A2 تا D2 مربوط به انجام تست در فشار 40bar، همچنین جرم سابوت و گلوله شلیک شده به هر یک از نمونه نیز در جدول 1 آمده است.

گلوله مورد استفاده در این پژوهش از جنس فولاد نقره‌ای و به شکل مخروطی با زاویه 60 درجه است. در شکل 5 تصویر گلوله مخروطی و جدول 2 مشخصات گلوله مخروطی آمده است.

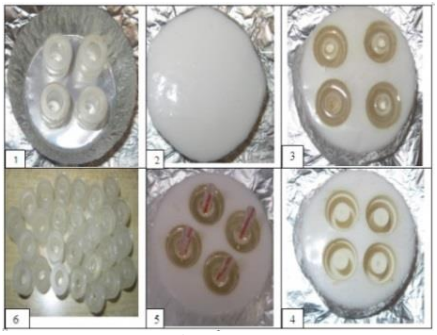

Fig. 4 construction processes of sub bullet

شکل 4 مراحل ساخت سابوت گلوله

جدول 1 مشخصات پنل‌های ساخته شده

Table 1 properties of made panels

نمونه	درصد نانولوله	جرم سابوت و گلوله (gr)	نمونه	درصد نانولوله	جرم سابوت و گلوله (gr)
Al	0.0	8.38	A2	0.0	8.055
B1	0.5	8.44	B2	0.5	8.385
C1	1.0	8	C2	1.0	8.226
D1	1.5	8.06	D2	1.5	8.285

Fig. 5 Conical bullet

شکل 5 گلوله مخروطی

جدول 2 مشخصات گلوله مخروطی

Table 2 properties of conical bullet

شکل دماغه	جنس	سختی (RC)	طول (mm)	قطر (mm)	جرم میانگین (gr)
Conical	Alloy steel	55-56	40	7.6	8.25

3- آزمایش‌های بالستیک

آزمایش‌های بالستیک توسط دستگاه تفنگ گازی دانشگاه بوعلی همدان انجام شد. فشار ورودی برای شلیک گلوله به وسیله گاز نیتروژن تأمین گردید. سرعت ورودی از روی نمودار فشار- سرعت که توسط سرعت‌سنج لیزری کالیبره شده است، مشخص می‌شود. سرعت ورودی تابعی از فشارگاز نیتروژن و جرم سابوت و گلوله است. پس از پرتاب سابوت و گلوله وخروج گلوله از هدف، سرعت خروجی به وسیله سرعت‌سنج لیزری مشخص می‌شود. شلیک گلوله‌ها از فاصله 3 متری و با دو فشار20bar و 40bar انجام شد. شکل 6 تصویر این تفنگ گازی را نشان می‌دهد.

4- نتایج و بحث

4-1- مشاهدات اولیه

در پدیده نفوذ، مکانیزم‌های شکست و خرابی نظیر اسپالینگ[1]، اسکبینگ[2]، پلاگینگ[3]، پتالینگ[4]، خردشدگی[5]، بالجینگ[6] و غیره رخ می‌دهد. علاوه‌بر این

Fig. 6 gas gun

شکل 6 تفنگ گازی

[1] Spalling
[2] Scabbing
[3] Plugging
[4] Petaling
[5] Fragmentation
[6] Bulging

لایه‌لایه شدن، خمش، کشیدگی غشایی[1]، برش عرضی[2]، شکست کششی و غیره پدیده‌های رایج در حین نفوذ پرتابه‌ها در اهداف است. البته همه این مکانیزم‌های شکست در اثر نفوذ یک پرتابه در هدف رخ نمی‌دهد. وقوع هر یک از این پدیده‌ها به عوامل مختلفی مانند ضخامت هدف، جنس هدف، شرایط تکیه‌گاهی، قطر پرتابه، شکل دماغه پرتابه، محدوده سرعت برخورد و غیره بستگی دارد. برای نمونه در اثر برخورد پرتابه با دماغه تخت با هدف به نسبت سخت و ضخامت در حدود قطر پرتابه قسمتی از هدف به نام پلاگ تحت تنش‌های برشی جدا شده و همراه پرتابه به سمت جلو پرتاب می‌شود که به این پدیده پلاکینگ گفته می‌شود. یا وقتی پرتابه نوک تیز به هدف نرم به نسبت نازکی برخورد کند، شکست ستاره‌ای شکل از یک نقطه شروع و به طور شعاعی در مسیرهای مجزا منتشر، چندین گلبرگ به شکل مثلث ایجاد شده و به سمت عقب خم می‌شود. این نوع شکست، پتالینگ نام دارد که پدیده غالب در پشت اهداف نازک بوده و بیشتر در برخورد پرتابه‌های مخروطی و اجیوال[3] دیده می‌شود.

با توجه به این‌که در این پژوهش از پرتابه‌های مخروطی استفاده شده و همچنین ضخامت اهداف نیز نازک است، پدیده پتالینگ مکانیزم شکست اصلی در بیشتر نمونه‌ها بود. همچنین می‌توان به قطر کم پرتابه و جنس مواد استفاده شده در ساختار پنل‌های هدف اشاره کرد که در پدیده پتالینگ نقش داشته‌اند. پدیده‌های دیگری در جذب انرژی توسط پنل‌ها نقش دارند که ازآن جمله می‌توان به لایه‌لایه‌شدگی بین لایه‌های کامپوزیتی، جدایش بین آلومینیوم و الیاف کولار، دمپ انرژی بین لایه‌های کامپوزیتی و ورق آلومینیوم و شکست کششی الیاف اشاره کرد. شکل‌های 7-10 نشان‌دهنده بعضی از پدیده‌های تخریب بر اثر برخورد پرتابه مخروطی به پنل‌های نانوکامپوزیتی است. شکل 7 پدیده پتال یا گلبرگ شدن نمونه در اثر برخورد بالستیکی را نشان می‌دهد. شکل 8 شکست کششی الیاف کولار در صفحه پشتی نمونه را نشان می‌دهد. در شکل 9 در اثر برخورد پرتابه مخروطی عمل بالجینگ یا دمپ انرژی اتفاق افتاده است. در شکل 10 علاوه‌بر دمپ انرژی مختصر عمل جدا شدن صفحه پشتی از لایه‌های کولار قابل مشاهده است.

2-4- بررسی مکانیزم‌های شکست پانل‌های چندلایه‌ای

سرعت خروجی از نمونه می‌تواند در بررسی رفتار ماده هدف مورد مطالعه قرار

Fig. 7 Petaling phenomenon due to the conical bullet nanocomposite panel

شکل 7 پدیده پتالینگ در اثر برخورد پرتابه مخروطی به پنل نانو کامپوزیتی

[1] Stretch Lead
[2] Transverse Shear
[3] Ogival

Fig. 8 Kevlar fiber tensile failure

شکل 8 شکست کششی الیاف کولار

Fig. 9 Damped energy generation between aluminum foil and layers of kevlar

شکل 9 ایجاد دمپ انرژی بین ورق آلومینیوم و لایه‌های کولار

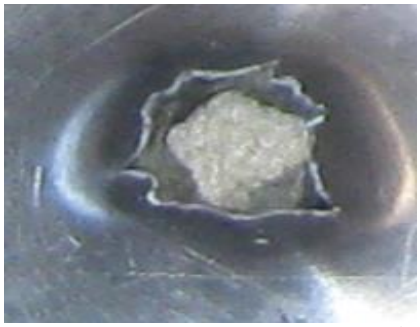

Fig. 10 The separation between the aluminum and kevlar fiber

شکل 10 جدایش بین ورق آلومینیوم و الیاف کولار

گیرد. به این صورت که هر مقدار سرعت خروجی از هدف کمتر باشد، نشان‌دهنده جذب انرژی بیشتر توسط هدف است. با توجه به نتایج جدول‌های 2 و 3 سرعت خروجی در نمونه‌های C1 و C2 به ازای یک درصد نانولوله کربنی کمترین مقدار است و سرعت خروجی با افزایش درصد وزنی افزایش می‌یابد.

استفاده از ذرات با ابعاد نانو منجر به بهبود استحکام کامپوزیت می‌شود. بخشی از این استحکام به دلیل اثرات استحکام‌بخشی ثانویه مانند استحکام‌بخشی نابه‌جایی است که می‌تواند به بهبود خواص مکانیکی منجر شود [20].

نیروهای واندروالس در نانولوله کربنی[4]/ پلیمر، مقاومت بین سطحی و انرژی لازم برای تشکیل ترک را افزایش می‌دهد. نانو تیوپ‌های کربنی با شعاع بزرگ قادرند تا سرعت‌های بالاتر گلوله را تحمل کنند. مقاومت بالستیکی وقتی بالاترین مقدار را پیدا می‌کند که گلوله به مرکز نانولوله کربنی برخورد

[4] CNT

کند. سان[1] و همکاران گزارش داده‌اند که نانولوله‌های کربنی چند دیواره[2] به عنوان پرکننده می‌توانند روی ظرفیت جذب انرژی پلیمرها و کامپوزیت‌های تقویت شده با فیبر تأثیر بگذارند. توزیع بهتر نانولوله کربنی قابلیت جذب انرژی را افزایش می‌دهد، ولی با افزایش درصد نانولوله کربنی ممکن است میزان بهبود متوقف یا معکوس شود و آن هم به این دلیل است که تجمع نانو ذرات به دلیل چسبندگی بین سطوح و کلوخه شدن و تشکیل عیوب در بالک ماده و تجزیه پیوند فصل مشترک، خواص مکانیکی کامپوزیت را خراب می‌کنند. تمرکز تنش در فصل مشترک منجر به شکست نانوکامپوزیت می‌شود [21].

پلیمر تقویت شده با نانولوله‌های کربنی چند دیواره چقرمه است، مقاومت به ضربه را افزایش می‌دهد و تمایل دارند تا ترک را به تأخیر اندازد. به ویژه زمینه نرم‌تر، زنجیرهای فیبری را به هم می‌آمیزد تا از تحرک آن‌ها جلوگیری، پرتابه را مجبور به توقف کند و تعداد زیادی زنجیرهای فیبری را بشکند. این‌ها حاصل افزایش جذب انرژی است. وقتی برخورد پرتابه و هدف رخ می‌دهد موج شوک از میان مواد عبور و پیشرفت کرده، مقداری از انرژی به صورت ارتعاش تبدیل می‌شود. نانولوله‌های کربنی چند دیواره خوب توزیع شده، یک شبکه دمپ‌کننده قوی خلق می‌کنند که قابلیت دمپینگ مواد کامپوزیتی را افزایش داده و تخریب لایه‌ها را کنترل می‌کنند [21].

توزیع و پراکندگی نانولوله‌ها از فاکتورهای اصلی است که نقش تعیین‌کننده‌ای برخواص نانوکامپوزیت حاصل دارد. توزیع و پراکندگی نانولوله‌ها درون اپوکسی مانع از تغییر شکل و جابه‌جایی زنجیره‌های پلیمر حین بارگذاری می‌شود. در نانوکامپوزیت‌های حاوی نانولوله، تماس فیزیکی در مقیاس مولکولی را می‌توان به عنوان فاکتور اصلی در تحمل تنش برشی بیشتر در فاز میانی نانولوله و پلیمر مورد بررسی قرار داد [22].

زمانی می‌توان به توان بالقوه نانولوله‌ها در تقویت ماتریس دست یافت که انتقال نیروی مؤثر از زمینه اپوکسی مجاور به نانولوله و عکس آن امکان‌پذیر باشد. انتقال بار بیشتری از زمینه به نانولوله با افزایش چسبندگی فاز میانی صورت می‌گیرد، از این‌رو مقدار بیشتری از بار توسط نانولوله تحمل خواهد شد. این امر با توجه به استحکام و مدول بالای این نانوذرات موجب افزایش در خواص نانوکامپوزیت‌ها خواهد شد. تشکیل پیوندهای کووالانسی میان نانولوله‌های کربنی و ماتریس اپوکسی را می‌توان به عنوان عامل تأثیرگذاری جهت افزایش استحکام و فراهم آوردن انتقال بار بهتر میان ماتریس و نانولوله دانست [23].

3-4- سرعت حد بالستیک و میزان جذب انرژی پنل‌های مختلف

میانگین جذب انرژی ویژه برای فشارهای 20 و 40 بار به ترتیب در جدول‌های 3 و 4 ارائه شده است. در این جدول‌ها جرم گلوله، سرعت ورودی پرتابه، سرعت خروجی پرتابه، میزان جذب انرژی و میزان جذب انرژی ویژه نشان داده شده است. برای محاسبه میزان جذب انرژی از روش بالانس انرژی استفاده شد. رابطه (1) بیانگر اختلاف انرژی جنبشی ورودی و انرژی جنبشی خروجی گلوله در برخورد با نمونه هدف است.

$$E= 1/2mV_i^2-1/2mV_O^2 \quad (1)$$

در رابطه (1) m جرم سابوت و گلوله و Vi سرعت ورودی پرتابه به هدف، Vo سرعت خروجی پرتابه و E نشان‌دهنده جذب انرژی توسط نمونه است.

با توجه به این‌که ساخت پنل‌ها به صورت لایه‌چینی دستی است پنل‌ها دارای اختلاف وزنی با هم هستند؛ بنابراین جهت واردکردن فاکتور جرم پنل در محاسبه سرعت حد بالستیک، میزان جذب انرژی ویژه که معادل میزان جذب انرژی تقسیم بر جرم هر پنل (E/M) به ابعاد $10\cdot10cm^2$ را محاسبه کرده تا اندازه دقیق‌تری از میزان قدرت بالستیکی پنل‌ها به دست آید. با استفاده از این پارامتر می‌توان کارایی هدف‌های مختلف را با یکدیگر مقایسه کرد. M نشان‌دهنده جرم پنل است.

با توجه به نتایج ارائه شده در جداول 3 و 4 مشخص می‌شود که جذب انرژی ویژه در پنل B1 و B2 مقداری افزایش یافته است. جذب انرژی ویژه در پنل C1 و C2 شامل یک درصد نانولوله کربنی بیشترین مقدار است. در نهایت جذب انرژی ویژه در پنل D1 وD2 کاهش یافته است؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که از میان پنل‌های نانو کامپوزیتی، پنل حاوی یک درصد نانولوله کربنی بیشترین کارایی بالستیکی را در هردو فشار 20bar و40bar داراست. با توجه به شکل 11 جذب انرژی ویژه نسبت به درصدهای مختلف نانولوله کربنی برای دو فشار 20bar و40bar مشخص است.

همچنین در جدول 5% افزایش و یا کاهش جذب انرژی بالستیکی نسبت به پنل فاقد نانولوله کربنی نشان داده شده است. با توجه به جدول 5 بیشترین درصد جذب انرژی ویژه مربوط به پنل C1 و C2 به اندازه 24.84 و 22.52 درصد است.

5- نتیجه گیری

در این تحقیق خواص بالستیک روی پنل‌های هیبرید آلومینیوم و

جدول 3 میانگین جذب انرژی ویژه برای فشار 20bar

Table 3 The average of specific energy absorption to pressure 20 bar

نمونه	میانگین سرعت ورودی پرتابه (m/sec)	میانگین سرعت خروجی پرتابه (m/sec)	جرم پانل (gr)	میانگین جذب انرژی (J)	میانگین جذب انرژی ویژه (J/Kg)
A1	219.88	164.85	112.53	88.71	788.323
B1	220.26	162.7	113.455	93.022	819.902
C1	217.5	139.5	113.175	111.384	984.175
D1	217.89	168.55	114.28	76.89	672.82

جدول 4 میانگین جذب انرژی ویژه برای فشار 40bar

Table 4 The average of specific energy absorption to pressure 40bar

نمونه	میانگین سرعت ورودی پرتابه (m/sec)	میانگین سرعت خروجی پرتابه (m/sec)	جرم پانل (gr)	میانگین جذب انرژی (J)	میانگین جذب انرژی ویژه (J/Kg)
A2	274.493	226.365	111.16	97.065	878.463
B2	274.766	226.8	112.415	102.73	913.846
C2	273.47	211.36	115.08	123.856	1076.26
D2	276.216	228.716	116.27	97.045	841.893

جدول 5 درصد جذب انرژی ویژه نسبت به پنل صفر درصد

Table 5 Specific energy absorption respect to zero percentege panels

نوع پنل	درصد جذب انرژی ویژه	نوع پنل	درصد جذب انرژی ویژه
Al	0.0	A2	0.0
B1	4.0	B2	4.02
C1	24.84	C2	22.52
D1	-14.65	D2	-4.16

[1] Sun
[2] MWCNTs

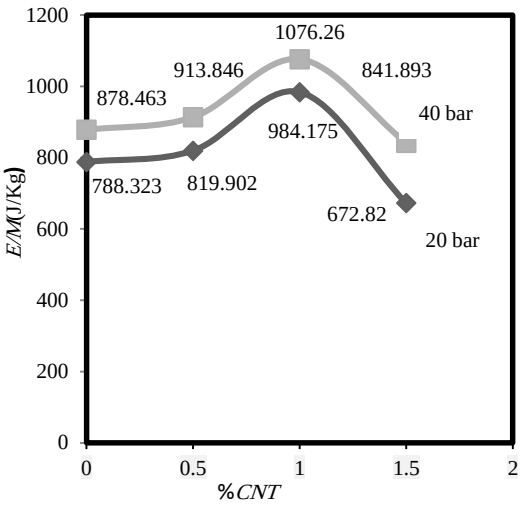

Fig. 11 Comparison of mean variations specific energy absorption for different percentages of carbon Nanotubes with Pressure 20bar and 40bar

شکل 11 مقایسه میانگین تغییرات جذب انرژی ویژه برای درصدهای مختلف نانو لوله کربنی با دو فشار 20bar و 40bar

نانوکامپوزیت کولار/ اپوکسی با درصدهای مختلف نانولوله کربنی به روش تجربی مورد بررسی قرار گرفت. مکانیزم‌های مختلفی برای جذب انرژی ضربه بالستیک در این پنل‌ها مشاهده شد. این مکانیزم‌ها به وسیله مودهای مختلفی از تغییر فرم یا تخریب در پنل‌ها ایجاد می‌شوند. ایجاد پتال در قسمت فلزی هدف‌ها و برش قسمت کامپوزیتی، مودهای مختلف تخریب موضعی آن‌ها را تحت اثر نفوذ گلوله مخروطی بیان می‌کند. ابعاد بریدگی پتال دیده شده در صفحه آلومینیومی پشتی، با افزایش نانولوله کربنی به 1% افزایش می‌یابد و در نمونه 1.5% دچار کاهش می‌شود. پدیده‌های جدایش و لایه‌شدگی، دمپ انرژی بین دو قسمت کامپوزیتی و صفحه پشتی آلومینیومی، مودهای اختصاصی در سازه‌های لایه‌ای است و مقداری از انرژی ضربه را جذب می‌کند.

پنل حاوی 1% نانولوله کربنی در فشار20bar گلوله مخلوطی، به اندازه 24.84% افزایش جذب انرژی ویژه بالستیکی داشته است، ولی افزایش این مقدار نانولوله کربنی تا 1.5% نه تنها موجب افزایش میزان جذب انرژی ویژه نمی‌شود، بلکه تا میزان 14.65% کاهش یافته است. این نتیجه با فشار برخورد 40bar تکرار و افزایش 22.52% برای پنل 1% و کاهش 4.16% برای پنل 1.5% حاصل شد. نتایج حاصل نشان می‌دهد که افزایش نانولوله‌های کربنی تا مقدار معینی سبب افزایش جذب انرژی ویژه می‌شود و اگر این مقدار از حدی بالاتر رود نه تنها باعث افزایش جذب انرژی ویژه نمی‌شود، عملکرد پنل‌ها در برخورد بالستیکی نیز کاهش می‌یابد.

6- فهرست علایم

V_i سرعت ورودی (ms^{-1})

V_o سرعت خروجی (ms^{-1})

m جرم سابوت و گلوله (gr)

M جرم پنل (gr)

E انرژی جذب شده ($kgm^{-2}s^{-2}$)

7- مراجع

[1] G. Reyes, H. Kang, Mechanical behavior of lightweight thermoplastic fiber–metal laminates, *Materials Processing Technology*, Vol. 186, No. 1, pp. 284-290, 2007.

[2] M. A. Chen, H. Z. Li, X. M. Zhang, Improvement of shear strength of aluminium-polypropylene lap joints by grafting maleic anhydride onto polypropylene, *Adhesion And Adhesives*, Vol. 27, No. 3, pp. 175-187, 2007.

[3] J. K. Kim, T. X. Yu, Forming and failure behavior of coated, laminated and sandwiched sheet metals: A review, *Materials Processing Technology*, Vol. 63, No. 1-3, pp. 33-42, 1997.

[4] T. Sinmazçelik, E. Avcu, M. Ö. Bora, O. Çoban, A review: Fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods, *Materials & Design*, Vol. 32, No. 7, pp. 3671-3685, 2011.

[5] H. Ahmadi, H. Sabouri, G. Liaghat, E. Bidkhori, Experimental and numerical investigation on the high velocity impact response of GLARE with different thickness ratio, *Procedia Engineering*, Vol. 10, pp. 869-874, 2011. (in Persian فارسی)

[6] H. Ahmadi, G. Liaghat, H. Sabouri, E. Bidkhouri, Investigation on the high velocity impact properties of glass-reinforced fiber metal laminates, *Composite Materials*, Vol. 47, No. 13, pp. 1605-1615, 2013. (in Persian فارسی)

[7] M. S. HooFatt, C. Lin, D. M. Revilock, D. A. Hopkins, Ballistic impact of GLARE™ fiber–metal laminates, *Composite Structures*, Vol. 61, pp. 73-88, 2003.

[8] H. Sabouri, H. Ahmadi, G. H. Liaghat, Ballistic impact perforation into GLARE targets: Experiment, numerical modelling and investigation of aluminium stacking sequence, *Vehicle Structures & Systems (IJVSS)*, Vol. 3, No. 3, pp. 178-183, 2011. (in Persian فارسی)

[9] H. Fischer, Polymer nanocomposites: From fundamental research to specific applications, *Materials Science and Engineering: C*, Vol. 23, pp. 763-772, 2003.

[10] J. Viana, Polymeric materials for impact and energy dissipation, *Plastics, Rubber and Composites*, Vol. 35, No. 6-7, pp. 260-267, 2013.

[11] W. Tang, M. H. Santare, S. G. Advani, Melt processing and mechanical property characterization of multi-walled carbon nanotube/high density polyethylene (MWNT/HDPE) composite films, *Carbon*, Vol. 41, No. 14, pp. 2779-2785, 2003.

[12] Z. Bartczak, A. Argon, R. Cohen, M. Weinberg, Toughness mechanism in semi-crystalline polymer blends: II. High-density polyethylene toughened with calcium carbonate filler particles, *Polymer*, Vol. 40, No. 9, pp. 2347-2365, 1999.

[13] M. Pol, G. Liaght, F. Hajiarazi, Experimental investigation of effect of nanoclay on ballistic properties of composites, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 1, pp. 11-20, 2012. (in Persian فارسی)

[14] M. Pol, G. Liaghat, E. Zamani, Effect of nanoclay particles on ballistic behavior of composites-theoretical and experimental investigation, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 6, pp. 30-42, 2013. (in Persian فارسی)

[15] G. Liaghat, M. Pol, A. Masudi, Effects of nanoclay on the ballistic behavior of GLARE-Experimental and numerical investigation, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 7, pp. 43-51, 2014. (in Persian فارسی)

[16] E. M. Soliman, M. P. Sheyka, M. R. Taha, Low-velocity impact of thin woven carbon fabric composites incorporating multi-walled carbon nanotubes, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 47, pp. 39-47, 2012.

[17] M. Khoshgoftar, G. Liaghat, *Experimental and Numerical Investigation of Perforation Behavior of Composite Laminates Reinforced with Carbon Nanotubes*, Tarbiat Modares University, Mechanical Engineering Department, 2010. (in Persian فارسی)

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

[19] "ASTM D 2651, Standard Guide for Preparation of Metal Surfaces for Adhesive Bonding, ASTM ed, 2001.

[20] R. P. K. a. S. B, Lightweight metal matrix nanocomposites - stretching the boundaries of metals, *Material Matters*, Vol. 2, No. 4, pp. 16-20, 2007.

[21] S. Laurenzi, Experimental study of impact resistance in multi-walled carbon nanotube reinforced epoxy, *Composite Structures*, Vol. 99, pp. 62-68, 2013.

[22] D. E. Qian D, R. Andrews , T. Rantell, load transfer and deformation mechanisms in carbon nanotubes-polystyrene composites, *Applied Physics Lettrs*, Vol. 76, No. 20, pp. 2868-2870, 2000.

[23] Y. Xu, S. Van Hoa, Mechanical properties of carbon fiber reinforced epoxy/clay nanocomposites, *Composites Science and Technology*, Vol. 68, No. 3, pp. 854-861, 2008.