



تأثیر تقویت کننده اکسید گرافن بر خواص بالستیک نانوکامپوزیت Al6061-GO

مهدی هدایتیان¹، خداداد واحدی²، علیرضا نظام آبادی^{1*}، امیر مومنی³

1- گروه مکانیک، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه امام حسین، تهران

3- دانشیار، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی همدان، همدان

* اراک، صندوق پستی 17849-36812، a-nezamabadi@iau-arak.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

دریافت: 97/8/8

پذیرش: 97/11/5

کلیدواژگان:

اکسید گرافن

نانو کامپوزیت

آلومینیوم 6061

حد بالستیک

جذب انرژی

در این مقاله تأثیر افزودن نانو صفحات اکسید گرافن بر خواص بالستیکی و جذب انرژی کامپوزیت زمینه آلومینیومی Al6061 تولید شده به روش ریخته گری گردابی و نورد گرم بررسی شده است. برای ساخت نمونه ها، از اختلاط نانو صفحات اکسید گرافن به عنوان تقویت کننده در درصد های وزنی 0.0، 0.2، 0.5 و 0.8 در مذاب آلیاژ آلومینیوم استفاده شد. سپس عملیات نورد گرم در دمای 530 درجه سانتی گراد روی قطعات ریخته گری انجام گرفت. رفتار مکانیکی نانوکامپوزیت با انجام آزمون کشش شبه استاتیکی بررسی شد. به علاوه آزمون نفوذ بر روی نمونه های Al6061-GO با ابعاد 60 میلی متر و ضخامت 4.2 میلی متر با استفاده از پرتابه های سر تخت، در سرعت های 100-300 متر بر ثانیه صورت گرفت. در 24 آزمایش، سرعت اولیه و باقیمانده پرتابه ها اندازه گیری شد و سرعت حد بالستیک برای نمونه های کامپوزیتی تعیین گردید. چقرمگی در آزمون کشش و همچنین مد شکست و میزان جذب انرژی نمونه ها در آزمون نفوذ مورد بحث قرار گرفتند. نتایج نشان داد که با افزودن درصد وزنی نانو صفحات اکسید گرافن، سرعت حد بالستیک نمونه های کامپوزیتی تا 24 درصد نسبت به آلیاژ پایه بهبود یافته است. همچنین میزان جذب انرژی نمونه های کامپوزیتی در بارگذاری شبه استاتیکی و ضربه ای به ترتیب 116 و 107 درصد نسبت به آلیاژ آلومینیومی 6061 افزایش داشته است. این مشاهدات نشان از نقش بسیار خوب نانو صفحات اکسید گرافن بر روی جذب انرژی آلیاژ آلومینیومی دارد.

Effect of graphene oxide reinforcement on the ballistic properties of Al6061-GO nanocomposites

Mahdi Hedayatian¹, Khodadad Vahedi², Alireza Nezamabadi^{1*}, Amir Momeni³

1- Department of Mechanical Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran

3- Department of Materials Science and Engineering, Hamedan University of Technology, Hamedan, Iran

* P.O.B. 17849-36812, Arak, Iran, a-nezamabadi@iau-arak.ac.ir

Keywords

Graphene oxide (GO)
Nanocomposites
Al 6061
Ballistic limit
Energy absorption

Abstract

In this paper, the effect of graphene oxide (GO) nanoplates on the ballistic properties and energy absorption of Al6061 aluminum matrix composites produced by stir casting and hot rolling was investigated. The Al6061-GO nanocomposites were fabricated by mixing GO nanoplates with weight percentages of 0.0, 0.2, 0.5 and 0.8, in the molten aluminum. Then, hot rolling was carried out at 530 °C on the cast samples. Mechanical behavior of nanocomposites was investigated by performing quasi-static tensile tests. The perforation tests on the Al6061-GO plates of 60×60×4.2 mm, was carried out using flat head projectiles, at the speeds of 100-300 m/s. The initial and residual velocity of projectiles measured through 24 experiments, and the ballistic limit velocity was calculated for the fabricated nanocomposites. The toughness, fracture mode and energy absorption of the samples, were evaluated through the tensile and perforation tests, respectively. The results showed that by adding GO nanoplates, the ballistic limit velocity of the composites specimens improves by 24 % with respect to the base alloy. Also, the energy absorption of composites specimens in quasi static and impact loading was ameliorated by 116 % and 107 % respectively. These results indicated that GO nanoplates are very effective on the energy absorption of 6061 aluminum alloy.

Please cite this article using:

Hedayatian, M. Vahedi, Kh. Nezamabadi, A.R. and Momeni, A., "Effect of graphene oxide reinforcement on the ballistic properties of Al6061-GO nanocomposites", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 6, No.3, pp. 401-410, 2019.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

1- مقدمه

در صنایع هوا و فضا، دفاعی و حمل و نقل، جذب انرژی و ایمنی سازه نکات کلیدی در فرایند طراحی وسایل نقلیه، کشتی ها و هواپیماها هستند. توسعه سازه های حفاظتی در برابر بارهای ضربه ای، مستلزم حفظ یکپارچگی ساختاری است که یکی از چالش های مهم در صنعت مدرن محسوب می شود. راه حل صحیح برای افزایش جذب انرژی در طراحی و ساخت سازه ها، انتخاب مواد مناسب است. در این چارچوب تلاش های زیادی در صنایع خودرو سازی، حمل و نقل و هواپیما به منظور توسعه آلیاژهای سبک (آلومینیوم، منیزیم و تیتانیوم) برای کاربردهای دینامیکی انجام شده است. به طور خاص، در بخش خودرو، آلیاژهای آلومینیومی در حال حاضر به طور گسترده ای در تولید قطعات ساختاری که وظیفه جذب انرژی در تصادف را دارند، استفاده می شوند [1,2]. هدف از افزایش ایمنی در وسایل نقلیه، ساخت سازه های مقاوم با استفاده از موادی مناسب با بیشترین نسبت استحکام به وزن است. بخش وسیعی از منابع علمی در این زمینه به مطالعه رفتار مکانیکی آلیاژهای مختلف آلومینیوم اختصاص یافته اند. در بررسی جذب انرژی ورق آلومینیومی در فرآیند نفوذ دینامیکی، تعیین پارامترهای تاثیر گذار بر ظرفیت بالستیکی نمونه هدف، مهم می باشد. متغیرهای حاکم بر سازه و کار نفوذ عبارتند از: ویژگی های هندسی و مکانیکی هدف و پرتابه، و شرایط واقعی ضربه که مربوط به سرعت پرتابه است [3]. مطالعات زیادی در رابطه با اثر بارهای ضربه ای بوسیله پرتابه ها بر روی نفوذ کامل در سازه های آلومینیومی در محدوده سرعت های مختلف انجام گرفته است [4-8]. تحقیقات گسترده ای به وسیله بورویک و همکاران [9-11] و گوپتا و همکاران [12,13]، بر روی متغیرهای مکانیکی گوناگونی از جمله جنس ماده هدف، ابعاد هدف و پرتابه، شکل هندسی پرتابه و سرعت اولیه پرتابه در حین فرآیند نفوذ، انجام شده است. در حین فرآیند نفوذ پرتابه در هدف، مطالعه سیستمی اثر تغییر شکل کلی¹ مانند خیز ورق، تغییر شکل های خمشی² و کشیدگی غشایی³ و همچنین تغییر شکل های محلی⁴ مانند شکل گیری حفره نرم⁵، پتالینگ⁶، پلاگینگ⁷، بالجینگ پستی⁸، دیشینگ⁹، پاره شدن کششی¹⁰، نازک شدگی¹¹، باند برشی¹² و گلوبی شدن¹³ لازم است [14]. با توجه به نوع هدف کامپوزیتی که مورد اصابت پرتابه قرار گرفته، ممکن است تمامی مکانیزم های موجود یا برخی از آن ها در حین فرآیند نفوذ موثر باشد [15]. همچنین مطالعه ظرفیت جذب انرژی صفحات فلزی می تواند اطلاعات مفیدی را از تاثیر ضربه موضعی بر پاسخ و تغییر شکل کلی سازه فلزی مهیا کند.

یکی از روش های بهبود خواص مکانیکی فلزات در سرعت های بارگذاری بالا استفاده از مواد کامپوزیتی زمینه فلزی با تقویت کننده های سرامیکی است. کامپوزیت های زمینه فلزی را می توان به عنوان دسته ای از مواد پیشرفته در نظر گرفت که دارای قابلیت های اساسی از جمله چگالی کم، استحکام بالا، مدول الاستیسیته زیاد، ضریب انبساط حرارتی پایین و مقاومت سایشی خوب می باشند [16]. معمولاً مجموعه این خواص در یک ماده غیر کامپوزیتی یافت نمی شود. افزودن ذرات مستحکم با مدول الاستیسیته بالا به زمینه فلزی منقطع، منجر به تولید موادی می شود که دارای خواص بینابین ذرات تقویت کننده و زمینه آلیاژی هستند [17]. کامپوزیت های زمینه آلومینیومی در

سال های اخیر به علت وزن کم، استحکام و سفتی زیاد، مدول ویژه بالا و مقاومت سایشی بسیار عالی توسعه بسیار زیادی یافته اند [18,19]. از جمله کاربردهای نانو کامپوزیت های مقاوم در برابر ضربه و دارای حد بالستیک بالا، زره ها هستند. اندازه بسیار کوچک و مقادیر کم نانو ذرات این امر را ممکن کرده است [20]. بر اساس پژوهش های انجام شده، استفاده از نانو تقویت کننده ها برای افزایش جذب انرژی ضربه بسیار مناسب می باشد [21]. به منظور طراحی بهینه این مواد باید ترکیبی از خواص چون مقاومت بالا به ضربه و نفوذ، دانسیته پایین، مدول الاستیسیته بالا، چقرمگی بالا، مقاومت به خوردگی بالا و مقاومت در مقابل خستگی را دارا باشند [22]. در حوزه نانو کامپوزیت ها مشاهده شده است که نانو کامپوزیت های منیزیم - آلومینا و آلومینیوم - کربید بور، در نرخ های بالای کرنش، خواص مکانیکی قابل توجهی از خود نشان داده اند که این امر با کاهش چشم گیر وزن در مقایسه با فولادهای زرهی همراه بوده است. همچنین نتایج مطالعات تجربی نشان داده است که مواد مدرج تابعی¹⁴ محتوی ذرات فلزی (تیتانیوم) و نانو ذرات سرامیکی (تیتانیوم دی بورید) استحکام بالایی دارند که به افزایش مقاومت در برابر نفوذ گلوله می انجامد [23].

نانوصفحه اکسید گرافن یک ساختار دو بعدی از یک لایه منفرد شبکه لانه زنبوری از جنس کربن است که به علت داشتن خواص فوق العاده در رسانایی الکتریکی و گرمایی، چگالی بالا و تحریک پذیری حامل های بار، خواص نوری و خواص مکانیکی به ماده ای منحصر به فرد تبدیل شده است [24,25]. بسیاری از محققان تأثیر حضور گرافن را بر روی پلیمرها بررسی کرده اند و دریافته اند که گرافن منجر به بهبود قابل توجه خواص مکانیکی کامپوزیت های پلیمری می شود. به عنوان مثال، کاتالیزیدو و همکاران [26]، خواص مکانیکی نانو کامپوزیت های پلی پروپیلن / نانوصفحات گرافن را مورد بررسی قرار دادند و مشاهده کردند که افزودن تا 3 درصد حجمی نانو صفحات گرافن به پلی پروپیلن موجب افزایش چشم گیر در مدول الاستیک، استحکام ضربه و استحکام خمشی می شود. شکریه و همکارانش [27]، به ساخت و مشخصه یابی آزمایشی نانو کامپوزیت های پلی پروپیلن / نانوصفحات گرافن پرداختند. آن ها دریافته اند که با اضافه کردن 0.5 درصد وزنی گرافن به پلی پروپیلن، 30 درصد افزایش در استحکام ضربه آن به وجود می آید.

زارعی و همکاران [28] رفتار مکانیکی نانو کامپوزیت اکسید گرافن / اپوکسی در نرخ کرنش های مختلف را با دستگاه هاپکینسون فشاری مورد مطالعه قرار دادند. مشاهده شد که افزودن اکسید گرافن به زمینه، باعث بالا رفتن سفتی و استحکام نانو کامپوزیت می شود. از مقایسه سطح شکست نمونه های ساده و نانو کامپوزیت با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی، مشاهده شد که سطح شکست نانو کامپوزیت دارای زبری بیشتری نسبت به اپوکسی است. این افزایش زبری دلایلی بر جذب انرژی بیشتر برای نانو کامپوزیت به هنگام شکست است. به عبارت دیگر به دلیل ایجاد میکرو ترک های بیشتر، ناشی از وجود نانو صفحات اکسید گرافن در کامپوزیت تولیدی، میزان جذب انرژی در نانو کامپوزیت بیشتر از اپوکسی خالص است. خوانساری و همکاران، پاسخ پل های هیبرید آلومینیوم سری 2024-T3 و نانولوله های کربنی را در آزمون ضربه بالستیک مورد بررسی قرار دادند. چهار

⁸ Rear bulging⁹ Discing¹⁰ Tensile tearing¹¹ Thinning¹² Shear banding¹³ Necking¹⁴ Functionally Graded Material (FGM)¹ Global deformations² Bending deformations³ Membrane stretching⁴ Local deformations⁵ Ductile hole formation⁶ Petalling⁷ Plugging

جدول 2 خواص فیزیکی نانو صفحات اکسید گرافن

Table 2 Physical properties of graphene oxide nanoplates

Parameter	Value
Thickness	3.4 (nm)
Layers	6-8
Ph	7.7
Volume Resistivity	4×10^{-4} (ohm.cm)
Diameter	1-8 (micron)
Specific Surface Area	750 (m ² /g)
Density	1 (gr/cm ³)

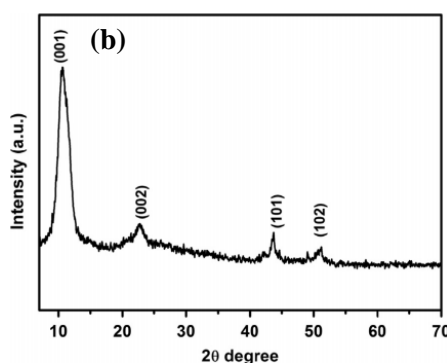
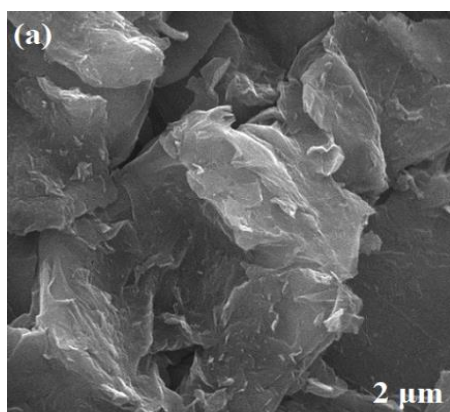


Fig. 1 (a) SEM micrograph and (b) XRD pattern of the graphene oxide nanoplates used in this research.

شکل 1 (a) تصویر میکروسکوپ SEM و (b) الگوی XRD نانو صفحات اکسید گرافن استفاده شده در این تحقیق

پس از تهیه ذوب، سطح آن با فلاکس کاورال به منظور عدم نفوذ اکسیژن به داخل مذاب، پوشش داده می‌شود. همچنین به منظور گاززدایی از قرص هگزاکلرواتان⁵ به مقدار 0.5 درصد وزنی استفاده شد. به موازات آماده سازی مذاب آلیاژ 6061، به منظور دفع رطوبت از ذرات تقویت کننده کپسول های حاوی نانو ذرات در دمای 600 درجه سانتی گراد به مدت 30 دقیقه پیش گرم می‌شوند. پس از آن کپسول های پیش گرم شده، حاوی 0.2، 0.5 و 0.8 درصد وزنی به مذاب افزوده شدند و عملیات هم زدن مذاب به مدت 10 دقیقه با سرعت 400 دور بر دقیقه انجام شد. سپس مذاب حاصل به درون یک قالب دو تکه فولادی مکعب شکل به ابعاد 100×150×33 mm که از قبل پیش گرم شده بود، ریخته گری شد. به منظور همگن سازی، شمش های ریخته گری شده

گروه از پتلها با درصدهای وزنی 0، 0.5، 1 و 1.5 ساخته شدند. آزمون های ضربه بالستیک با استفاده از پرتاب گلوله مخروطی 7.6 گرمی و با دو سرعت میانگین 220 و 275 متر بر ثانیه توسط تفنگ گازی انجام شد. نتایج تحقیق نشان داد، پتل حاوی 1 درصد وزنی نانولوله کربنی بیشترین جذب انرژی و مقاومت بالستیکی را دارا است [29].

توجه به منابع موجود نشان می‌دهد اکثر پژوهش های انجام شده بر روی تاثیر تقویت کننده های گرافنی بر روی زمینه پلیمری و همچنین رفتار مکانیکی این کامپوزیت ها تحت بارگذاری استاتیکی متمرکز شده است و تحقیقات محدودی در خصوص نقش این تقویت کننده ها بر مقاومت ضربه ای کامپوزیت زمینه فلزی صورت گرفته است. همچنین به دلیل بالا بودن مساحت سطح ویژه اکسید گرافن (تقریباً 12.8 برابر بزرگ تر از نانولوله های کربنی [30]) این ایده وجود دارد که تاثیر این نانوصفحات بر خواص مکانیکی کامپوزیت های زمینه فلزی بیش از ذرات دیگر مانند نانولوله های کربنی باشد. بر این مبنا، رویکرد اصلی تحقیق حاضر، بررسی نقش نانو صفحات اکسید گرافن بر روی خواص مکانیکی و جذب انرژی آلیاژ آلومینیوم 6061 در پدیده نفوذ می‌باشد.

2- روش تحقیق

2-1- مواد

در این پژوهش از آلیاژ آلومینیومی Al6061 و نانو پودر اکسید گرافن با خلوص بالای 99 درصد (ساخت شرکت یو اس ریسرچ نانومتریال¹) استفاده شده است. ترکیب شیمیایی شمش آلیاژ Al6061 مطابق استاندارد ASTM E1259 در جدول 1 و خواص فیزیکی نانو صفحات اکسید گرافن در جدول 2 ارائه شده است. در شکل 1، تصویر میکروسکوپی و نتیجه پراش پرتو ایکس² نانو صفحات اکسید گرافن نشان داده شده است. از شکل 1 مشخص است که نانو صفحات گرافن با ظاهری چروکیده³ و به هم پیچ خورده⁴، به صورت توده چند لایه بر روی هم همپوشانی دارند.

2-2- نحوه آماده سازی نمونه ها

نحوه آماده سازی ذرات تقویت کننده بدین صورت بود که نانو صفحات اکسید گرافن ابتدا در مایع استون به مدت 10 دقیقه و به کمک پراب التراسونیک هم زده شد تا نانو ذرات از یکدیگر جدا و پخش شوند (شکل 2-a) و سپس مخلوط تهیه شده بر روی فویل آلومینیومی اسپری شد (شکل 2-b). پس از گذشت چند دقیقه استون از سطح فویل تبخیر شد. جهت سهولت افزودن نانو ذرات به مذاب، تقویت کننده ها در داخل فویل آلومینیومی به صورت کپسول های کوچکی با درصد وزنی مختلف آماده شدند. در مرحله بعد قطعات کوچکی از ورق آلومینیومی Al6061 به وزن 1500 گرم در داخل بوتله گرافیتی حرارت داده شدند. به منظور افزایش ترشوندگی پودر اکسید گرافن با آلومینیوم، یک درصد وزنی منیزیم به مذاب افزوده شد [31]. عملیات ذوب سازی آلیاژ آلومینیوم در دمای ثابت 700 درجه سانتی گراد صورت گرفت.

جدول 1 ترکیب شیمیایی شمش آلیاژ Al6061 (wt. %)

Table 1 Chemical composition of Al6061 ingot (wt. %)									
	Al	Mg	Si	Fe	Cu	Cr	Ti	Mn	Zn
Rem.	0.79	0.51	0.39	0.19	0.09	0.04	0.01	0.01	

⁴ Twisted

⁵ C₂Cl₆

¹ US research nanomaterials company

² XRD

³ Wrinkled

60×60 میلی‌متر و ضخامت 4.2 میلی‌متر بود بین دو صفحه نگهدارنده فولادی با ضخامت 6 میلی‌متر به طور ثابت قرار گرفتند، به طوری که شرایط مرزی کاملاً گیردار برای نمونه‌ها تامین گردد. برای ثبت سرعت اولیه و باقیمانده پرتابه در جلوی لوله تفنگ گازی از یک جفت منبع نور لیزر که متصل به یک شمارنده زمان است استفاده شد. در آزمایش‌ها، از پرتابه عملیات حرارتی شده از جنس فولاد VCN200، با سر تخت به طول 20 میلی‌متر، قطر 6 میلی‌متر، جرم 4.5 گرم، سختی راکول 50 HRC و استحکام تسلیم 1700 مگاپاسکال استفاده شد. برای پر کردن فضای خالی مابین پرتابه و لوله تفنگ گازی و به منظور جلوگیری از تماس پرتابه و لوله با یکدیگر از تفلون جنس پلی اورتان که به اصطلاح سابوت¹ گفته می‌شود استفاده شده است. با توجه به اینکه قطر داخلی لوله شلیک حدود 11 میلی‌متر بوده سابوت با طول 14 و قطر خارجی 10 میلی‌متر تراشکاری شده و در مرکز آن سوراخی به قطر 6 میلی‌متر ایجاد شد به طوری که پرتابه در داخل آن با عمق 8 میلی‌متر قرار گیرد (شکل 5).



Fig. 3 Tensile test sample

شکل 3 نمونه آزمون کشش

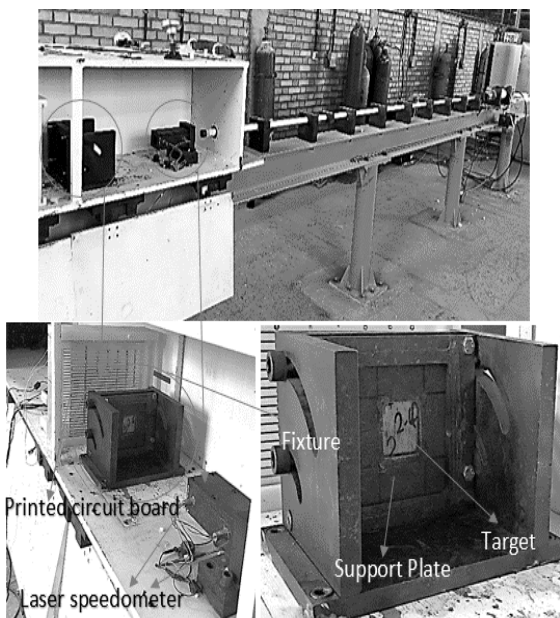


Fig. 4 Gas gun machine used for ballistic testing

شکل 4 دستگاه تفنگ گازی استفاده شده جهت آزمون بالستیک

در کوره الکتریکی به مدت 2 ساعت در دمای 580 درجه سانتی‌گراد قرار داده می‌شود و سپس در آب 25 درجه سانتی‌گراد سریع سرد شدند [32].

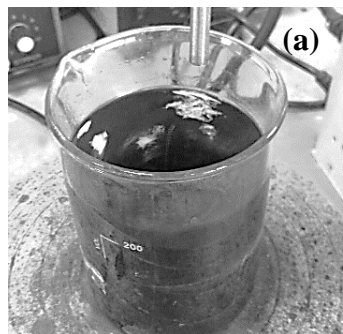


Fig. 2 preparation steps of graphene oxide powder: a) sonication of GO in acetone with ultrasonic probe and b) mixture sprayed on aluminum foil

شکل 2 مراحل آماده سازی پودر اکسید گرافن، الف) هم زدن مخلوط GO و استون به کمک پراب التراسونیک و ب) اسپری مخلوط بر روی فویل آلومینیومی

به منظور حذف تمامی عیوب ساختاری نظیر تخلخل‌های حاصل از عملیات ریخته‌گری گردابی و همچنین ناهمگنی‌های ترکیب شیمیایی، شمش‌های ریخته‌گری تحت عملیات نورد گرم قرار گرفته است. بدین منظور، پس از پیش گرم شمش‌های کامپوزیتی تا دمای 550 درجه سانتی‌گراد، عملیات نورد گرم از ضخامت 33 میلی‌متر به صورت پیوسته تا ضخامت نهایی 4.2 میلی‌متر (87% کاهش ضخامت) در طی 8 پاس نورد گرم به انجام می‌رسد.

3- آزمایش‌های تجربی

3-1- آزمایش کشش تک محوری

برای تعیین استحکام کششی مطابق استاندارد ASTM-B557، نمونه‌های کامپوزیتی به طول 100 mm و عرض 10 mm و طول موثر 25 mm در راستای نورد با دستگاه وایرکات بریده شده و پس از پرداخت سطح، آزمون کشش تک محوری با استفاده از دستگاه سنتام SANTAM STM-150 با سرعت بارگذاری 1 میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. قابل ذکر است که در هر درصد وزنی 3 نمونه و در کل 12 نمونه مورد آزمایش قرار گرفتند و میانگین آن‌ها به صورت نمودارهای تنش- کرنش مهندسی گزارش شد. در شکل 3 تصویر نمونه آزمون کشش نشان داده شده است.

3-2- آزمایش بالستیک

آزمایش‌های بالستیک با استفاده از تفنگ گازی که در شکل 4 نشان داده شده است انجام شدند. هنگام آزمایش هر یک از صفحات هدف که دارای ابعاد

¹ Sabot

خلاصه نتایج آزمون کشش در جدول 3 گویای آن است که استحکام تسلیم و نهایی نانوکامپوزیت آلومینیومی با 0.8 درصد اکسید گرافن، به ترتیب 43 و 38 درصد نسبت به نمونه پایه افزایش داشته است. انعطاف پذیری نمونه کامپوزیتی با 0.8 درصد وزنی اکسید گرافن نیز نسبت به نمونه پایه 58 درصد افزایش را نشان می‌دهد.

از مقایسه انرژی تغییر شکل مکانیکی در واحد حجم نانوکامپوزیت تا نقطه شکست که به عنوان چقرمگی کششی ماده در نظر گرفته می‌شود، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش درصد وزنی اکسید گرافن از 0.0 به 0.8، میزان چقرمگی از 17.87 به 38.6 می‌رسد که نشان دهنده افزایش چشمگیر 116 درصدی چقرمگی شکست در نانوکامپوزیت Al6061-0.8 wt. % GO می‌باشد. به نظر می‌رسد نانو صفحات اکسید گرافن به دلیل مساحت سطح ویژه بالا به صورت مانع در برابر رشد ترک عمل کرده و سبب انحراف مسیر رشد ترک شده است. این عامل منجر به جذب انرژی بالا در هنگام شکست می‌شود. چسبندگی خوب بین تقویت کننده با زمینه فلزی و توزیع مناسب تقویت کننده‌ها به دلیل انجام عملیات نورد گرم، در عین حال که باعث افزایش استحکام مکانیکی آلیاژ شده، شکل پذیری کامپوزیت‌ها را هم تقویت کرده است.

در جدول 4 اطلاعات تجربی آزمون ضربه برای نمونه‌های آلومینیومی ساده و کامپوزیتی نشان داده شده است. در بررسی نفوذ پرتابه در ورقه‌های نانو کامپوزیت Al-GO دو کمیت حد بالستیک و میزان جذب انرژی جذب شده اهمیت زیادی دارند. سرعت حد بالستیک، حداقل سرعتی است که پرتابه می‌تواند صفحه هدف را سوراخ کند و با سرعت صفر از آن خارج شود. بالاتر بودن سرعت حد بالستیک بیانگر مقاوم بودن آلیاژ نسبت به نفوذ پرتابه است. همچنین انرژی جذب شده توسط کامپوزیت آلومینیومی، برای مقایسه عملکرد ساختار می‌تواند استفاده شود.

در فرآیند انجام آزمایش مشخص شد که پرتابه فولادی دچار هیچ گونه فرسایشی نشده است. در نتیجه رفتار آن را در حین نفوذ می‌توان صلب در نظر گرفت.

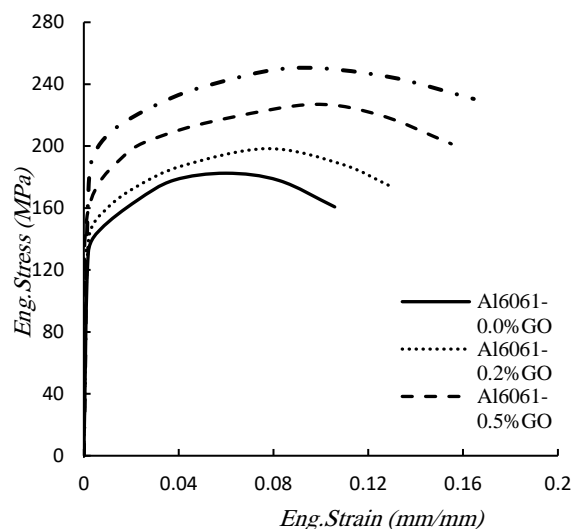


Fig. 7 Engineering stress-strain curves of the fabricated samples
شکل 7 منحنی های تنش-کرنش مهندسی نمونه های ساخته شده

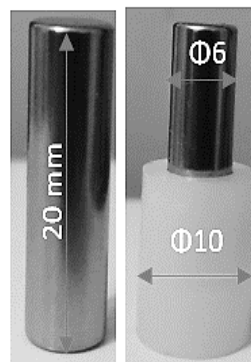


Fig. 5 Geometry of the projectile and the sabot used in the ballistic tests
شکل 5 شکل هندسی پرتابه و سابوت استفاده شده در آزمون های بالستیک

جهت بدست آوردن سرعت اولیه شلیک یا همان سرعت خروجی پرتابه، از روش واسنجی¹ فشار مخزن-سرعت خروجی استفاده شده است. در این روش با تنظیم فشار هوا بر روی فشار مشخص و انجام چند پرتاب، سرعت هر پرتاب اندازه گیری می‌شود و سرعت متناظر با فشار مذکور محاسبه می‌شود. منحنی عملکردی دستگاه تفنگ بادی برای دستیابی به سرعت اولیه مورد نیاز با انجام 10 شلیک در غیاب هدف، در شکل 6 نشان داده شده است. منحنی توانی برازش شده بر روی اطلاعات تجربی، این امکان را برای اپراتور فراهم می‌کند که برای رسیدن به سرعت اولیه مطلوب، با چه فشاری دستگاه را استارت کند. در نتیجه 6 آزمون ضربه برای هر نمونه در محدوده سرعت 100-300 متر بر ثانیه صورت گرفت. در 24 آزمایش انجام شده، سرعت اولیه و باقیمانده پرتابه‌ها به وسیله سرعت سنج لیزری اندازه‌گیری شد و سرعت حد بالستیک برای نمونه‌های نانو کامپوزیتی محاسبه شد.

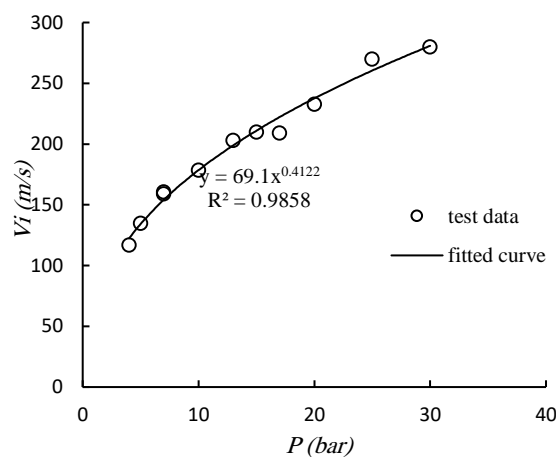


Fig. 6 Functional diagram of the initial velocity of projectile versus the air pressure of gas gun
شکل 6 نمودار عملکردی سرعت اولیه پرتابه بر حسب فشار هوای اسلحه گازی

4- نتایج و بحث

نتایج آزمون کشش شبه استاتیکی در قالب منحنی های تنش-کرنش مهندسی در شکل 7 ارائه شده‌اند. افزایش در سطح استحکام تسلیم و کششی آلیاژ با افزودن ذرات GO مشهود است. نکته قابل توجه در این نمودارها بهبود همزمان استحکام و انعطاف پذیری نمونه‌های کامپوزیتی با افزایش مقدار GO است.

¹ Calibration

این سرعت حداقل را سرعت حد بالستیک V_{bl} می‌نامند. با قرار دادن $V_f=0$ و جایگزینی رابطه (3) در رابطه (2)، انرژی شکل گیری پلاگ برشی برابر است با:

$$W_s = \frac{1}{2} \left(\frac{M_p}{M_p + m_p} \right) M_p V_{bl}^2 \quad (4)$$

با جایگزینی روابط (3 و 4) در رابطه (2)، مقدار سرعت باقی مانده پرتابه عبارت است از:

$$V_r = \left(\frac{M_p}{M_p + m_p} \right) (V^2 - V_{bl}^2)^{1/2} \quad (5)$$

در فرآیند نفوذ پرتابه در اهداف ضخیم، در صورتی که هیچ گونه پلاگ برشی تولید نشود، رابطه بالا به شکل زیر ساده می‌شود:

$$V_r = (V^2 - V_{bl}^2)^{1/2} \quad (6)$$

روابط تحلیلی-تجربی دیگری نیز برای پیش بینی سرعت باقی مانده پرتابه در اهداف فلزی وجود دارد که از مهم ترین آن‌ها می‌توان به رابطه لامبرت-جوناس [33] اشاره کرد که سرعت باقی مانده را تابعی از سرعت اولیه پرتابه به شکل زیر بیان می‌کند:

$$V_r = a(V^p - V_{bl}^p)^{1/p} \quad (7)$$

که ضرایب a و p با تحلیل رگرسیون حداقل مربعات منحنی بالستیک به دست می‌آیند. همچنین می‌توان رابطه (7) را به صورت بی بعد به شکل زیر نوشت:

$$\frac{V_r}{V_{bl}} = a \left[\left(\frac{V}{V_{bl}} \right)^p - 1 \right]^{1/p} \quad (8)$$

در اهداف نازک مقدار a با استفاده از اطلاعات آزمایشگاهی و به صورت زیر تعیین می‌شود [34]:

$$a = \frac{M_p}{M_p + m_p} \quad (9)$$

با توجه به داده‌های آزمایشگاهی در جدول 3 و حل تحلیلی در رابطه (7)، منحنی سرعت باقیمانده بر حسب سرعت اولیه پرتابه در حین نفوذ کامل در کامپوزیت های آلومینیومی، تعیین و نتایج در شکل 8 نشان داده شده است. با انجام برازش، منحنی بالستیک برای هر نمونه فلزی ترسیم شده است و ضرایب رابطه (7) در جدول 5 ثبت شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود با افزایش میزان GO افت چشم گیری در سرعت باقی مانده ایجاد می‌گردد؛ که این امر گویای افزایش قدرت جذب انرژی در کامپوزیت های آلومینیوم با افزایش میزان GO است.

با اندازه گیری جرم پلاگ های برشی جدا شده از اهداف مختلف مشخص شد که وزن آنها 0.3 گرم می‌باشد و با استفاده از رابطه (9) مقدار فاکتور a برابر 0.94 بدست می‌آید که با مقدار آن از روش برازش که در جدول 5 آمده مطابقت خوبی دارد.

جدول 5 ضرایب V_{bl} ، a و p در رابطه (7)

Table 5 Coefficients V_{bl} , a and p in equation (7)

wt. %	a	p	V_{bl} (m/s)
0.0		2.85	127
0.2	0.95	2.60	138
0.5		2.32	145
0.8		2.13	158

جدول 3 نتایج استحکام تسلیم، استحکام کشش نهایی، کرنش شکست و چقرمگی کششی نانو کامپوزیت های آلومینیومی

Table 3 Yield strength, ultimate tensile strength, breaking strain and tensile toughness of aluminum nanocomposites

Sample	S_y (MPa)	S_{ut} (MPa)	ϵ_f (%)	Toughness (MJ.m ⁻³)
Al6061-0.0%GO	129	182	10.6	17.87
Al6061-0.2%GO	140	198	13.0	23.61
Al6061-0.5%GO	159	227	15.6	26.4
Al6061-0.8%GO	185	251	16.7	38.6

با توجه به اصل بقاء مومنتوم برای پرتابه صلب با سرعت اولیه V ، جرم M_p ، که با سرعت باقیمانده V_r ، هدف را به طور کامل سوراخ می‌کند و باعث تشکیک پلاگ برشی از هدف به جرم m_p می‌شود، خواهیم داشت:

جدول 4 اطلاعات تجربی آزمون ضربه برای نمونه های آلومینیومی

Table 4 Impact test experimental data for Al alloys

Sample	V_i (m/s)	V_f (m/s)	Sample	V_i (m/s)	V_f (m/s)
	249	230		261	221
Al6061-0.0wt%GO	205	179	Al6061-0.5wt%GO	215	163
	175	138		185	15
	161	112		161	82
	138	67		151	32
	132	31		140	-
	265	231		283	225
Al6061-0.2wt%GO	209	172	Al6061-0.8wt%GO	265	210
	203	167		226	151
	159	93		193	117
	144	56		162	47
	130	-		151	-

$$M_p V = (M_p + m_p) V_r \quad (1)$$

با نوشتن اصل بقاء انرژی در فرآیند نفوذ:

$$\frac{1}{2} M_p V^2 = \frac{1}{2} (M_p + m_p) V_r^2 + W_s + E_d \quad (2)$$

که در این رابطه، W_s انرژی لازم برای شکل گیری پلاگ برشی و E_d انرژی لازم برای تغییر شکل پلاستیک (کار پلاستیک) در هدف می‌باشد. میزان کار پلاستیک، اختلاف بین انرژی جنبشی اولیه و نهایی پرتابه است. با بکار بردن معادله (1) خواهیم داشت:

$$E_d = \frac{1}{2} \left(\frac{m_p}{M_p + m_p} \right) M_p V^2 \quad (3)$$

میزان اتلاف انرژی بخاطر پلاگ های برشی از رابطه (2) با پیدا کردن حداقل سرعتی که باعث ایجاد سرعت باقی مانده صفر می‌شود، پیدا می‌شود.

بالاتری اتفاق می‌افتد. در نتیجه انرژی بیشتری می‌بایست صرف تغییر شکل نمونه‌های کامپوزیتی شود.

در نانو کامپوزیت Al6061-0.8 wt.% GO با افزایش سرعت نفوذ از 151 به 283 متر بر ثانیه، جذب انرژی نمونه کامپوزیتی افزایشی به میزان 30% را نشان می‌دهد. این افزایش را می‌توان ناشی از بهبود مقاومت تسلیم نمونه فلزی در نرخ کرنش‌های بالاتر دانست. ضربه سرعت بالا به دلیل ماهیت دینامیکی که دارد منجر به ایجاد نرخ کرنش بالا در هنگام نفوذ پرتابه در هدف می‌گردد [35]. با افزایش نرخ کرنش با توجه به ماهیت رفتار دینامیکی مواد، سرعت بارگذاری زودتر از عکس العمل رفتاری مواد رخ می‌دهد در نتیجه تسلیم به تاخیر می‌افتد و استحکام تسلیم دینامیکی نیز بیشتر می‌شود.

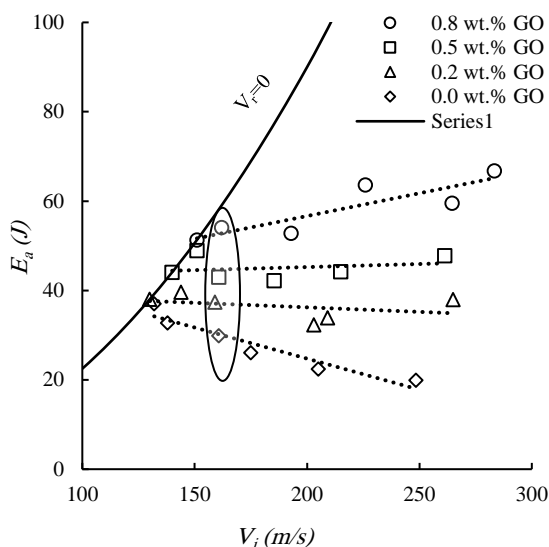


Fig. 9 Energy absorption of aluminum alloy targets versus the initial velocity of the projectile

شکل 9 میزان جذب انرژی اهداف آلیاژ آلومینیومی بر حسب سرعت اولیه پرتابه

در شکل 10 نمای پشتی و جلویی هدف آلومینیومی و تصویر بزرگنمایی شده حفره حاصل از عبور پرتابه در دو سمت هدف نشان داده شده است. میزان تغییر در ظرفیت جذب انرژی صفحه فلزی بستگی به شکل گیری حفره ایجاد شده و مد شکست نمونه پس از پدیده نفوذ کامل دارد. با استفاده از پرتابه سر تخت در محدوده سرعت 100-300 متر بر ثانیه شکل شکست در لبه سوراخ ایجاد شده در دو سمت هدف، به صورت بازشدگی حفره نرم³ است؛ به طوری که ماده هدف در جبهه جلوی پرتابه به سمت ضخامت هدف فشرده می‌شود. البته یک برآمدگی موضعی پشتی² نیز همراه با ترک‌های شعاعی کوچک مشاهده می‌شود. همچنین پلاگ دایره‌ای خارج شده، قطر مشابه پرتابه دارد. در شکل 11 خیز ایجاد شده در نمونه های آلیاژ آلومینیومی 6061 با درصد وزنی های مختلف به ترتیب از چپ به راست پس از انجام آزمون بالستیک از نمای جانبی نشان داده شده است.

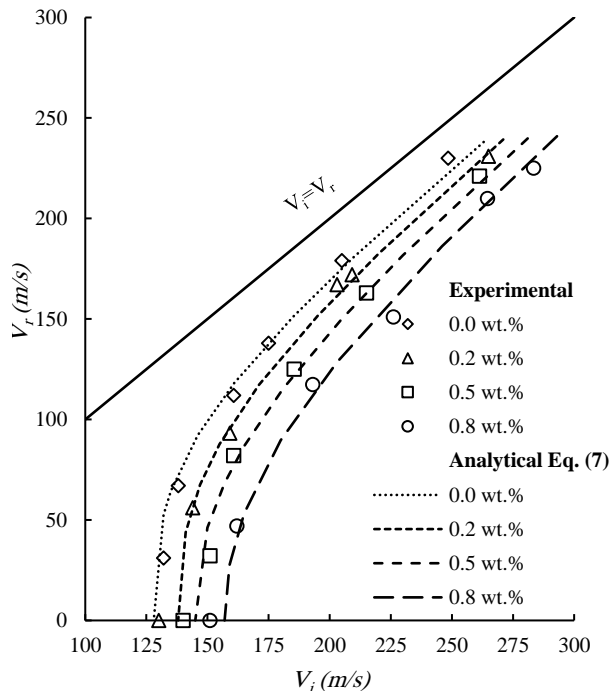


Fig. 8 Residual velocity (V_r) versus the initial velocity (V_i) of the projectile for different aluminum samples

شکل 8 نمودار سرعت باقیمانده بر حسب سرعت اولیه پرتابه برای نمونه های مختلف آلومینیومی

شکل 9 میزان جذب انرژی اهداف کامپوزیتی بر حسب سرعت اولیه پرتابه را ارائه می‌کند. مقدار جذب انرژی ورق آلومینیومی حین فرآیند نفوذ با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$E_a = \frac{1}{2} M_p (V_i^2 - V_r^2) \quad (10)$$

با توجه به شکل 9، میزان جذب انرژی نمونه آلیاژ آلومینیوم پایه با افزایش سرعت اولیه پرتابه روند کاهشی را نشان می‌دهد. در حالی که با افزایش درصد وزنی نانو صفحات اکسید گرافن در زمینه، میزان جذب انرژی نانو کامپوزیت ساخته شده روند افزایشی را نشان می‌دهد. به طوری که در حدود سرعت 160 متر بر ثانیه که با ناحیه بیضی مشخص شده، میزان جذب انرژی نمونه آلیاژ آلومینیومی پایه 19.88 ژول و برای نمونه های کامپوزیتی با درصد های وزنی برابر با 0.2، 0.5 و 0.8 از زمینه آلومینیوم، به ترتیب 37.41، 42.97 و 54.08 ژول می‌باشد. این نتایج حاکی از افزایش بسیار عالی 172 درصدی جذب انرژی نانو کامپوزیت Al6061-0.8wt%GO نسبت به آلیاژ آلومینیومی Al6061-0.0wt%GO است. به طور میانگین، در سرعت های اولیه مختلف جذب انرژی نمونه های حاوی 0.8 درصد وزنی اکسید گرافن در مقایسه با نمونه آلیاژ پایه، افزایش 107 درصدی را نشان می‌دهد.

این طور می‌توان استنباط کرد که در نمونه آلومینیومی پایه در محدوده سرعت های بیشتر از حد بالستیک، انرژی لازم برای شکست باندهای برشی¹ روند کاهشی دارد. در حالی که با افزودن نانو صفحات اکسید گرافن به آلیاژ آلومینیومی در موضع ضربه، مقاومت شکست باندهای برشی در سرعت های

³ Localised rear bulging

¹ Shear bands

² Ductile hole enlargement

در تایید نتایج آزمون‌های کشش در شکل 4 ذرات GO باعث افزایش انعطاف پذیری یکنواخت در زمینه آلومینیومی شده‌اند.

در شکل 12، مقایسه بین میزان درصد افزایش چقرمگی و جذب انرژی نمونه‌های کامپوزیتی نسبت به آلیاژ آلومینیوم پایه صورت گرفته است. مشخص است که با افزودن درصد وزنی نانو صفحات اکسید گرافن به آلیاژ آلومینیومی 6061، مقادیر جذب انرژی نمونه‌ها در هر دو حالت استاتیکی و دینامیکی بهبود می‌یابد که نشان از عملکرد عالی تقویت کننده‌های اکسید گرافن در نانو کامپوزیت Al6061-GO است؛ به عبارت دیگر نانو کامپوزیت تولیدی به علت استحکام و همچنین انعطاف پذیری بالا، می‌تواند در بارگذاری‌های ضربه-ای نیز مفید واقع شود و جذب انرژی بالایی داشته باشد.

5- نتیجه گیری

در این تحقیق خواص مکانیکی نانو کامپوزیت Al6061-GO با درصد‌های وزنی 0.0، 0.2، 0.5 و 0.8 از نانو صفحات اکسید گرافن در زمینه آلومینیومی بررسی شد. نمونه‌ها تحت بارگذاری کشش شبه استاتیکی و بارگذاری ضربه ای در سرعت 100 الی 300 متر بر ثانیه قرار گرفتند. میزان چقرمگی آزمون کشش و همچنین مد شکست و میزان جذب انرژی نمونه‌ها در آزمون نفوذ تعیین و مورد بحث قرار گرفتند. نتایج نشان داد که ظرفیت جذب انرژی ورق‌های آلومینیومی تابعی از رفتار ماده هدف در حین نفوذ است. مشاهده شد که با افزودن درصد وزنی نانو صفحات اکسید گرافن، تغییر شکل موضعی جای خود را به تغییر شکل کلی در هدف می‌دهد.

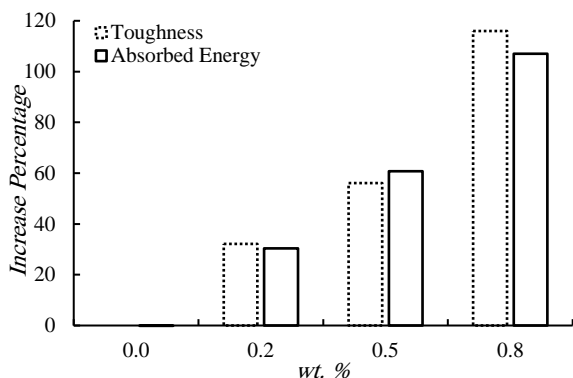


Fig. 12 Comparison of toughness and absorbed energy between the composite and the base samples

شکل 12 مقایسه بین میزان درصد افزایش چقرمگی و جذب انرژی نمونه‌های کامپوزیتی نسبت به آلیاژ آلومینیوم پایه

همچنین سرعت حد بالستیک نمونه‌های کامپوزیتی تا 24 درصد نسبت به آلیاژ پایه بهبود می‌یابد. میزان جذب انرژی نمونه‌های کامپوزیتی در بارگذاری شبه استاتیکی و ضربه‌ای به ترتیب 116 و 107 درصد نسبت به آلیاژ آلومینیومی 6061 افزایش داشته است که نشان از نقش بسیار خوب نانو صفحات اکسید گرافن بر روی جذب انرژی آلیاژ آلومینیومی دارد.

6- مراجع

[1] Miller, W. S., Zhuang, L., Bottema, J., Wittebrood, A. J., Smet, P. D., Haszler, A., "Recent Development in Aluminium Alloys for the Automotive Industry," Mater Sci Eng A, Vol. 280, pp. 37-49, 2000.

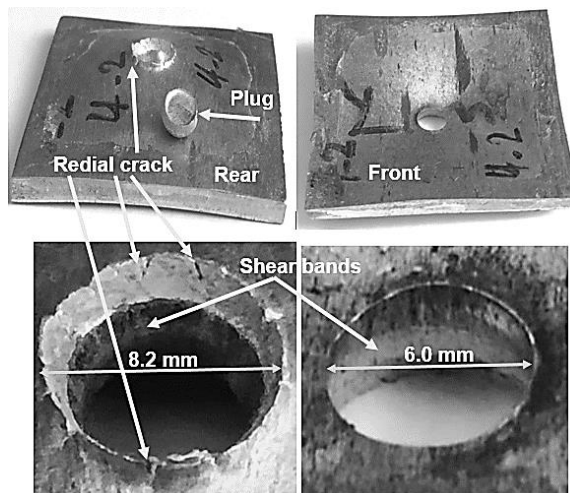


Fig. 10 Front and rear view of the aluminum target and the enlarged view of the hole

شکل 10 نمای پشتی و جلویی هدف آلومینیومی و شکل بزرگنمایی شده حفره



Fig. 11 Global deformation of aluminum alloy samples from the side view of the impact test

شکل 11 تغییر شکل کلی نمونه‌های آلیاژ آلومینیومی از نمای جانبی در آزمون ضربه

مشخص است که با افزایش درصد وزنی نانو صفحات اکسید گرافن در زمینه آلومینیومی، خیز ایجاد شده که در اثر تغییر شکل خمشی و تغییر شکل کششی غشایی به وجود آمده به ترتیب از چپ به راست بیشتر شده است. این موضوع بیانگر افزایش ظرفیت جذب انرژی در نمونه‌های نانو کامپوزیت Al-GO نسبت به آلیاژ پایه آلومینیومی 6061 می‌باشد. به نظر می‌رسد بالا بودن مساحت سطح ویژه نانو صفحات اکسید گرافن ($750 \text{ m}^2/\text{g}$) باعث انتقال بهتر بار، از زمینه به تقویت کننده باعث شده است. این انتقال موثر اثر مستقیمی بر خواص مکانیکی نانو کامپوزیت‌ها دارد [30,36,37]. در نمونه آلیاژ آلومینیوم پایه تغییر شکل موضعی در محل اصابت پرتابه به هدف مشاهده می‌شود در حالی که در نانو کامپوزیت آلومینیومی با افزایش درصد وزنی تقویت کننده، تغییر شکل عمومی و نه موضعی در نمونه‌ها مشاهده می‌شود. به بیان دیگر و

- [22] Sinmazçelik, T., Avcu, E., Bora, M. Ö., Çoban, O., "A Review: Fibre Metal Laminates, Background, Bonding Types and Applied Test Methods," *Materials & Design*, Vol. 32, No. 7, pp. 3671-3685, 2011.
- [23] Parhizkar, M., Vaziri, A., "Study of Mechanical and Ballistic Properties of Nano Armor", In Persian, *Iranian Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 23, No. 99, pp. 62-73, 2014.
- [24] Geim, A. K., Novoselov, K. S., "The Rise of Graphene", *Nature Materials*, Vol. 6, No. 3, pp. 183-191, 2007.
- [25] Kim, H., Abdala, A. A., Macosko, C. W., "Graphene/Polymer Nanocomposites", *Macromolecules*, Vol. 43, No. 6, pp. 6515-6530, 2010.
- [26] Kalaitzidou, K., Fukushima, H., Drzal, L. T., "Mechanical Properties and Morphological Characterization of Exfoliated Graphite-Polypropylene Nanocomposites", *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, Vol. 38, No. 7, pp. 1675-1682, 2007.
- [27] Shokrieh, M. M., Ahmadi Joneidi, V., "Manufacturing and Experimental Characterization of Graphene/Polypropylene Nanocomposites", In Persian, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 11, pp. 55-63, 2014.
- [28] Zarei Darani, S., Naghdabadi, R., Jokar, E., Irajizad, A., "Experimental Study on Mechanical Properties of Graphene Oxide/Epoxy Nanocomposites in Different Strain rates," In Persian, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 12, pp. 61-66, 2016.
- [29] Khansari, M., Khodarahmi, H., Vaziri, A., "Experimental Study of Ballistic Properties of Hybrid Aluminum and Epoxy Matrix Composite Reinforced with Carbon Nanotube," In Persian, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 8, pp. 126-132, 2017.
- [30] Shin, S. E., Choi, H. J., Shin, J. H., Bae, D. H., "Strengthening Behavior of Few-Layered Graphene/Aluminum Composites," *Carbon*, Vol. 82, pp. 143-151, 2015.
- [31] Milliere, C., Suery, M., "Fabrication and Properties of Metal Matrix Composites Based on SiC Reinforcement Reinforced Aluminum Alloys," *Mater. Sci. Technol.* Vol. 4, pp. 41-51, 2013.
- [32] Tabesh, A. Ebrahimi, Gh. and Ezatpour, H.R., "The Investigation and Comparison of Mechanical Properties and Microstructure Al/CNT and Al/CNT/Al₂O₃ Composites Produced by Mixed Accumulative Roll Bounding", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 4, No. 4, pp. 464-470, 2018.
- [33] Zukas, J. A., Nicholas, R., Swift, H. F., Greszczuk, L. B., Curran, D. R., "Impact Dynamics," John Wiley & Sons, New York, chapter 5, 1982.
- [34] Raguramana, M., Debb, A., Gupta, N. K., "Semi-Empirical Procedures for Estimation of Residual Velocity and Ballistic Limit for Impact on Mild Steel Plates by Projectiles," *Lat. Am. J. Solids Struct.*, Vol. 7, pp. 63-76, 2010.
- [35] Khoramshad, H., Khodaei, M. and Bagheri Tofighi, M., "Sensitivity of the Impact Behavior of Multi-layered Metal Laminates to the Position of Material Parameters Variations", in Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 1, No. 1, pp. 23-34, 2014.
- [36] Nouri Niyaraki, M., Ashenai Ghasemi, F., Ghasemi, I., and Daneshpayeh, S., "Experimental Analysis of Graphene Nanoparticles and Glass Fibers Effect on Mechanical and Thermal Properties of Polypropylene/EPDM Based Nanocomposites", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 5, No. 2, pp. 169-176, 2018.
- [37] Kazemi khasrag, E. Siadati, M.H. and Eslami-Farsani, R., "Effect of Surface Modification of Graphene Nanoplatelets on the High Velocity Impact Behavior of Basalt Fibers Reinforced Polymer-Based Composites", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 5, No. 1, pp. 109-116, 2018.
- [2] Smerd, R., Winkler, S., Salisbury, C., Worswick, M., Lloyd, D., Finn, M., "High Strain Rate Tensile Testing of Automotive Aluminum Alloy Sheet," *Int J Impact Eng*, Vol. 32, pp. 541-560, 2005.
- [3] Rodríguez-Millán, M., Vaz-Romero, A., Rusinek, A., Rodríguez-Martínez, J. A., Arias, A., "Experimental Study on the Perforation Process of 5754-H111 and 6082-T6 Aluminium Plates Subjected to Normal Impact by Conical, Hemispherical and Blunt Projectiles," *Exp. Mech.*, Vol. 54, No. 1, pp. 729-742, 2014.
- [4] Corran, R. S. J., Shadbolt, P. J., Ruiz, C., "Impact Loading of Plates –an Experimental Investigation," *Int J Impact Eng*, Vol. 1, pp. 13-22, 2009.
- [5] Fagerholt, E., Grytten, F., Gihleengen, B. E., Langseth, M., Børvik, T., "Continuous Out-of-Plane Deformation Measurements of AA5083-H116 Plates Subjected to Low-Velocity Impact Loading," *Int J Mech Sci*, Vol. 52, pp. 689-705, 2010.
- [6] Mohotti, D., Ngo, T., Mendis, P., Raman, S. N., "Polyurea Coated Composite Aluminium Plates Subjected to High Velocity Projectile Impact," *Int J Mater Des*, Vol. 52, pp. 1-16, 2013.
- [7] Iqbal, M. A., Khan, S. H., Ansari, R., Gupta, N. K., "Experimental and Numerical Studies of Double Nosed Projectile Impact on Aluminum Plates," *Int J Impact Eng*, Vol. 54, pp. 232-45, 2013.
- [8] Antoinat, L., Kubler, R., Barou, J. L., Viot, P., Barrallier, L., "Perforation of Aluminium Alloy Thin Plates," *Int J Impact Eng*, Vol. 75, pp. 255-67, 2015.
- [9] Børvik, T., Langseth, M., Hopperstad, O. S. S., Malo, K. A., Berstad, T., "Perforation of 12 mm Thick Steel Plates by 20 mm Diameter Projectiles with Flat, Hemispherical and Conical Noses Part II: Numerical Simulations," *Int. J. Impact Eng*, Vol. 27, pp. 37-64, 2002.
- [10] Børvik, T., Hopperstad, O. S., Langseth, M., Malo, K. A., "Effect of Target Thickness in Blunt Projectile Penetration of Weldox 460 E Steel Plates," *Int. J. Impact Eng*, Vol. 28 (4), pp. 413-464, 2003.
- [11] Børvik, T., Clausen, A. H., Hopperstad, O. S., Langseth, M., "Perforation of AA5083-H116 Aluminium Plates with Conical-Nose Steel Projectiles—Experimental Study," *Int. J. Impact Eng*, Vol. 30 (4), pp. 367-384, 2004.
- [12] Gupta, N. K., Madhu, V., "Normal and Oblique Impact of Kinetic Energy Projectile on Mild Steel Plates," *Int. J. Impact Eng*, Vol. 12 (3), pp. 333-343, 1992.
- [13] Gupta, N. K., Iqbal, M. A., Sekhon, G. S., "Experimental and Numerical Studies on the Behavior of Thin Aluminum Plates Subjected to Impact by Blunt- and Hemispherical-Nosed Projectiles," *Int. J. Impact Eng*, Vol. 32 (12), pp. 1921-1944, 2006.
- [14] Rodriguez-Millan, M., Garcia-Gonzalez, D., Rusinek, A., Abed, F., Arias, A., "Perforation Mechanics of 2024 Aluminum Protective Plates Subjected to Impact by Different Nose Shapes of Projectiles," *Thin-Walled Struct*, Vol. 123, pp. 1-10, 2018.
- [15] Taghipoor, H., Malekzade Fard, K., Bigdeli, A., "Experimental, Numerical and Analytical Study of Energy Absorption in High Velocity Penetration Phenomena on Composite Targets", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 5, No. 1, pp. 12-24, 2018.
- [16] Alemi Ardakani, E., Kalantar, M., Mosallae Pour, M., Ghasemi Banad Kouki, S. S., "Production and Characterization of in-situ Al-Mn-Al₂O₃ Composite Produced in Al-MnO₂ System", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 3, No. 3, pp. 277-284, 2016.
- [17] Khademian, M., Saeedi Heydari, M., Alizadeh, A., Baharvandi, H. R., "Investigation the Effect of Hot Rolling Process on Properties and Microstructure of Al-B₄C Composite by Vort," In Persian, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, pp. 140-146, 2014.
- [18] Onoro, J., Salvador, M., Cambroner, L., "High-Temperature Mechanical Properties of Aluminium Alloys Reinforced with Boron Carbide Particles," *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 499, pp. 421-426, 2009.
- [19] Yazdani, A., Salahinejad, E., "Evolution of Reinforcement Distribution in Al-B₄C Composites During Accumulative Roll Bonding," *Materials & Design*, Vol. 32, No. 6, pp. 3137-3142, 2011.
- [20] Lee, Y. S., Wetzel, E. D., Egres, R. G., Wagner, N. J., "Advanced Body Armor Utilizing Shear Thickening Fluids," 23rd Army Science Conference, Orlando, pp. 29-40, 2002.
- [21] Sun, L., Gibson, R. F., Gordaninejad, F., Suhr, J., "Energy Absorption Capability of Nanocomposites: A Review," *Compos. Sci. Technol.*, Vol. 69, pp. 2392-2409, 2009.

