مجله مهندسی مکانیک مدرس، مهر 1395، دوره 16، شماره 7، ص‌ص 219-228

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

ساخت و مجهزسازی ماشین ضربه‌سقوطی کم‌سرعت جهت تعیین ظرفیت جذب انرژی در فوم کامپوزیتی با زمینه آلومینیوم

حسین فراهت[1]، سید یوسف احمدی بروغنی[2*]

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند
2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند
* بیرجند، صندوق پستی 97175/615، syahmadi@birjand.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 09 اردیبهشت 1395
پذیرش: 28 خرداد 1395
ارائه در سایت: 29 تیر 1395

کلید واژگان:
فوم کامپوزیتی $A356/SiC_p$
آزمون ضربه سقوطی
مدار لودسل
جذب انرژی

چکیده

در مقاله حاضر، ظرفیت جذب انرژی فوم آلومینیوم A356 تقویت شده با ذرات SiC تحت بار ضربه‌ای مورد مطالعه قرار گرفته و نتایج جدیدی حاصل گردید. ماده فومی با استفاده از روش ذوبی به‌کمک عامل فوم‌ساز $CaCO_3$، ساخته شد. دستگاه آزمون ضربه‌سقوطی در مقیاس آزمایشگاهی طراحی و ساخته شد. مدار کامل نیروسنج دینامیکی (لودسل) طراحی و روی آن نصب گردید. آزمایش ضربه با استفاده از یک ضارب نیم‌کروی و با سرعت 6.70 m/s، بر روی نمونه‌های فوم انجام شد. نمودار تغییرات نیرو برحسب زمان به‌دست آمد و نتایج حاصله، با نتایج به‌دست آمده از سنسور پیزوالکتریک مقایسه شد که مطابقت خوبی بین آن‌ها وجود دارد. پاسخ ضربه به‌دست آمده برای فوم‌کامپوزیتی $A356/SiC_p$، یک پاسخ کم‌نوسان (حداکثر با 5.8% نوسان) و پایدار است که بیانگر طراحی مناسب ماشین و خروجی قابل‌اعتماد آن می‌باشد. هم‌خوانی رفتار ماده با نتایج محققین دیگر نیز، بر این امر صحه می‌گذارد. پاسخ مذکور شامل سه ناحیه الاستیک، بار پلاتو و شکست می‌باشد؛ در ناحیه پلاتو، فوم می‌تواند تغییرشکل‌های پلاستیک را در یک بار تقریباً ثابت تحمل نماید. پایان ناحیه پلاتو و شروع ناحیه شکست ماده، در لحظه‌ای اتفاق می‌افتد که نرخ انرژی جذب‌شده توسط فوم کاهش می‌یابد. مقدار بار پلاتو و انرژی جذب شده که توسط لودسل برآورد شده است، بترتیب برابر با 1.62 kN و 22.04 J بوده که در مقایسه با سنسور پیزوالکتریک، دارای خطای نسبی 1.8 و 7.7 درصد می‌باشد. مقدار (و درصد) انرژی جذب‌شده در نواحی الاستیک، پلاتو و شکست به‌ترتیب برابر با 6.07 J (27.5%)، 6.58 J (29.9%) و 9.39 J (42.6%) می‌باشد.

Design and instrumentation of low velocity drop-weight impact testing machine for estimation of energy absorption capacity in aluminum based composite foam

Hossein Farahat, Seyed Yousef Ahmadi Brooghani*

Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran
* P.O.B. 97175/615, Birjand, Iran, syahmadi@birjand.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 28 April 2016
Accepted 17 June 2016
Available Online 20 July 2016

Keywords:
A356/SiCp composite foam
Drop-weight impact test
Load-cell circuit
Energy absorption

ABSTRACT

In this paper, the energy absorption capacity of A356 aluminum foam reinforced by SiC particles under impact loading was studied. The foam was manufactured by direct foaming of melts with blowing agent CaCO3. The drop-weight impact testing machine was designed and fabricated. The dynamic load-cell circuit was designed and mounted on the impactor. The impact test was carried out using a hemispherical indenter with a velocity of 6.70 m/s on the foam specimens, and the load-time history data was obtained. The results were compared with the results reported by a piezoelectric force sensor and validated. The obtained impact response of A356/SiCp composite foam is stable, which represents the suitable design of the machine and its reliable output. This is emphasized by comparison of material behavior with the results of other researchers. The response includes three stages: an initial linear behavior, a plateau of load and failure of the foam. In plateau region, the plastic deformations can be tolerated by the foam at nearly constant load. The end of plateau region and beginning of the failure region occur at the moment when the rate of energy absorbed by the foam is decreasing. The values of plateau load and absorbed energy estimated from load-cell are 1.62 kN and 22.04 J respectively, which has a relative error of 1.8% and 7.7% in comparison with piezoelectric sensor. The value and percentage of absorbed energy were obtained as 6.07 J, 6.58 J, 9.39 J and 27.5%, 29.9%, 42.6% for elastic, plateau and failure regions respectively.

1- مقدمه

تلاش محققان همواره در جهت کشف و خلق موادی بوده است که علاوه بر داشتن استحکام مناسب، سبک‌تر باشند. در بسیاری از کاربردها خواص مکانیکی مخصوص[1] (خواص مکانیکی بر واحد وزن ماده)، بسیار مهم‌تر از خواص مطلق بدون در نظر گرفتن وزن می‌باشد. به‌منظور کاهش وزن، ایجاد

[1] Specific Mechanical Properties

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
H. Farahat, S. Y. Ahmadi Brooghani, Design and instrumentation of low velocity drop-weight impact testing machine for estimation of energy absorption capacity in aluminum based composite foam, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 7, pp. 219-228, 2016 (in Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.7.11.6]

حفره‌های پر شده از هوا یا گازهای خنثی در داخل ماده زمینه و به عبارتی تولید یک ماده متخلخل[1] تحت عنوان "فوم"، مدنظر بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است [1].

بسیاری از فلزات و آلیاژها مانند آلومینیوم، فولاد، مس، نیکل، سرب، روی، منیزیم و تیتانیم، قابلیت فومی‌شدن را با استفاده از فرآیندهای تولیدی مختلف دارند. در این میان استفاده از فلز آلومینیوم به‌عنوان ماده زمینه فوم، به‌دلیل داشتن وزن سبک و نقطه ذوب پایین (که باعث تسهیل در فرآیند تولید فوم می‌گردد) و نیز به دلیل دارا بودن سفتی ویژه[2] بالا، مقاومت خوب در برابر خوردگی، نسبت استحکام به وزن بالا، ظرفیت جذب انرژی عالی، قابلیت بازیافت و همچنین قابلیت تولید ساختارهای سلولی نسبتاً همگن و همسانگرد، توجه زیادی را در سال‌های اخیر به خود جلب کرده است. وجود ریزساختار سلولی در فوم‌های فلزی[3] و به ویژه فوم‌های آلومینیومی، این امکان را برای آن‌ها فراهم می‌آورد که مقدار زیادی از انرژی جنبشی ناشی از برخورد را قبل از این‌که موجب تخریب سازه گردد، جذب نمایند و لذا در مواردی که مقاومت در برابر ضربه یا نفوذ نیاز است، این دسته از مواد به‌عنوان جاذب انرژی عمل می‌کنند. دارابودن ویژگی‌های مذکور، سبب شده تا فوم‌های آلومینیوم در کاربردهای متعددی مانند صنایع خودرو، هوافضا و کشتی‌سازی به‌طور گسترده، مورد استفاده قرار گیرند. همچنین از فوم آلومینیوم، به عنوان ماده هسته در ساختارهای ساندویچی تحت شرایط بارگذاری مختلف (از قبیل ضربه ناشی از گلوله یا موج انفجار در کاربردهای حفاظتی) استفاده می‌شود. در واقع، وجود فوم باعث می‌شود که بار ضربه‌ای ماکزیمم زیر حد آستانه‌ای که موجب آسیب به جسم محافظت شده می‌گردد، نگه‌داشته شود [2-5]. بنابر توضیحات فوق، بررسی جزئیات رفتار مکانیکی فوم، تحت بار دینامیکی ضروری به نظر می‌رسد.

مطالعات قبلی انجام‌گرفته بر روی فوم‌های آلومینیومی تحت فشار دینامیکی در نرخ کرنش بالا، اساساً بر روی حساسیت پارامترهای مختلف (مانند تنش پلاتو[4] و مدول[5]) به نرخ کرنش[6] تمرکز کرده‌اند [6-9] تا از قابلیت جذب انرژی بالای آنها برای کاربردهای عملی استفاده شود. در این مطالعات، از میله فشاری اسپلیت- هاپکینسون[7] استفاده شده است. بیشتر این مطالعات، نشان می‌دهد که میزان حساسیت مذکور، به نوع فوم آلومینیوم بستگی دارد [10]. میزان جذب انرژی فوم‌ها با چگالی یکسان، بسته به نرخ کرنش می‌تواند متفاوت باشد. همچنین مشاهده شده که با کاهش چگالی فوم، اثرات نرخ‌کرنش افزایش می‌یابد که این امر به فشار گاز درون سلول‌ها مرتبط است.

برای کاربردهای نرخ کرنش نسبتاً کم (ضربه سرعت پایین)، قابلیت فوم برای تضعیف بار ضربه‌ای و نیز جذب انرژی ضربه، حائز اهمیت است. یک روش کلاسیک، برای بررسی پاسخ دینامیکی مواد مهندسی در نرخ کرنش‌های پایین، آزمایش ضربه سقوطی[8] می‌باشد. موهان و همکاران [11]، چو و همکاران [12]، کاسترو و همکاران [13]، هان و همکاران [14]، هوسان و ژائونگ [15]، با استفاده از ماشین اینسترون دایناتاپ[9]، آزمایش ضربه سقوطی کم سرعت را بر روی انواع فوم آلومینیوم انجام داده‌اند و پاسخ ضربه اعمالی به ساختار فوم را اندازه‌گیری کرده‌اند. نتایج آن‌ها بیانگر مقاومت فوم در برابر بار ضربه‌ای و نیز انرژی جذب شده توسط فوم در طی زمان ضربه می‌باشد. راماچاندرا و همکاران [16]، رفتار جذب انرژی ضربه توسط فوم آلومینیوم را در سرعت پایین 3.7 m/s و نیز در سرعت‌های بالا (بین 22 تا 30 m/s)، با استفاده از ضربه‌زن[10] با انتهای تخت و انتهای کروی بررسی کرده‌اند. نتایج آن‌ها نشان داد که در سرعت‌های بالا، نرخ کرنش، اینرسی و موج تنش اعمالی تأثیر بسزایی داشته و مقاومت فوم در برابر نفوذ افزایش می‌یابد. نتایج پرونی و همکاران [17]، نشان داد که لوله آلومینیومی پرشده با فوم آلومینیوم (یک ساختار کامپوزیتی) می‌تواند به افزایش بار فروپاشی[11] و نیز جذب انرژی بالا، منجر شود.

تعدادی مطالعات تجربی نیز در داخل کشور، بر روی ساختارهای فومی تحت ضربه انجام شده است. ضیاء شمامی و همکاران [18] با استفاده از یک تفنگ گازی، خواص بالستیکی فوم آلومینیوم را مطالعه نمودند. آن‌ها با اندازه‌گیری سرعت ورودی و سرعت خروجی پرتابه، انرژی جذب شده توسط فوم را محاسبه کردند و تأثیر پارامترهای چگالی فوم، ضخامت فوم و سرعت پرتابه را بر روی میزان جذب انرژی ماده بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش پارامترهای مذکور، میزان جذب انرژی ماده بیشتر می‌شود. چوبینی و همکاران [19]، به بررسی رفتار جذب انرژی و تغییرشکل لوله‌های آلومینیومی جدارنازک (توخالی و توپر با فوم پلی‌اورتان) تحت بار ضربه‌ای عرضی پرداختند و با انجام آزمایش سقوط وزنه بر روی لوله‌ها (با مقاطع دایره‌ای و مربعی) با انرژی‌های مختلف، مقدار شتاب را در طی زمان برخورد اندازه‌گیری نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که در شرایطی که انرژی وارده بر سازه در اثر تصادف کم باشد، استفاده از لوله‌های دایره‌ای مناسب‌تر است و در شرایط انرژی‌های بالاتر برخورد، لوله‌های مربعی کارایی بیشتری دارند. همچنین استفاده از ساختار فومی، باعث افزایش میزان جذب انرژی می‌شود.

اگرچه استفاده از فوم آلومینیوم در مواد مرکب[12] (مانند صفحات ساندویچی[13] با هسته فومی) بسیار رایج است، اما اگر خواص و رفتار مکانیکی هر کدام از مواد به تنهایی بررسی نشود، امکان توسعه مواد مرکب با مشکلات عدیده‌ای مواجه خواهد شد. بنابراین انجام مطالعات پایه بر روی خواص مکانیکی هر ماده (به تنهایی) امری ضروری و بسیار مهم است؛ مطالعاتی که تأمین کننده اطلاعات لازم برای توسعه مواد کامپوزیتی پیشرفته به‌شمار می‌رود. مقاله حاضر، بخشی از یک کار پژوهشی دنباله‌دار و با رویکرد مذکور می‌باشد که به بررسی رفتار فوم آلومینیوم، تحت ضربه با سرعت پایین می‌پردازد. ماده خاص (جدید) مورد مطالعه در کار حاضر، فوم آلومینیوم A356 تقویت‌شده به‌وسیله ذرات کاربید سیلیسیم SiC (فوم کامپوزیتی $A356/SiC_p$) می‌باشد. روش تولید ماده، روش ذوبی می‌باشد که در آن از پودر کربنات‌کلسیم $CaCO_3$، به عنوان عامل فوم‌ساز استفاده شده است. به منظور بررسی تجربی، دستگاه آزمون ضربه سقوطی طراحی و ساخته شده و مدار کامل نیروسنج دینامیکی (لودسل) بر روی آن نصب گردیده است. پس از کالیبره‌کردن دستگاه و صحت‌سنجی آن، آزمایش ضربه بر روی فوم آلومینیوم انجام شده و رفتار مکانیکی ماده در طی زمان ضربه، مورد بحث و بررسی قرار گرفته و میزان جذب‌انرژی فوم تعیین شده است. با توجه به عدم وجود داده‌های آزمایش ضربه بر روی فوم $A356/SiC_p$، ضرورت انجام پژوهش با هدف بررسی پاسخ ضربه ماده مذکور و تفسیر دقیق نتایج به‌دست

[1] Porous Material
[2] Specific Stiffness
[3] Metal Foams
[4] Plateau Stress
[5] Modulus
[6] Strain Rate Sensitivity
[7] Split-Hopkinson Pressure Bar
[8] Drop-Weight Impact Experiment
[9] Instron Dynatup
[10] Impactor
[11] Collapse Load
[12] Composite Materials
[13] Sandwich Panels

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.7.11.6]

آمده، حائز اهمیت می‌باشد. در مقاله حاضر، با دقت به این موضوع پرداخته شده است. همچنین لازم به ذکر است که در مقاله حاضر، برای اولین بار در کشور، کلیه مراحل طراحی و ساخت ماشین آزمون ضربه‌سقوطی سرعت‌پایین و نحوه مجهزسازی آن به حسگرهای الکترونیکی، برای استفاده سایر محققین با دقت و به تفصیل بیان شده است. استفاده از سنسورهای مختلف در ثبت داده‌ها و مقایسه نتایج آن‌ها با یکدیگر، به‌عنوان نقطه قوت مقاله حاضر می‌باشد. نحوه کالیبراسیون دستگاه و به‌کار بردن سنسورهای نیروسنج مختلف و نیز بیان جزئیات مربوط به مشخصات سنسورهای استفاده شده (شتاب‌سنج، لودسل و نیروسنج تجاری پیزوالکتریک)، از موارد دیگر نوآوری تحقیق می‌باشد. استانداردهای مربوط به طراحی دستگاه و مشکلات موجود در روند تکاملی ساخت دستگاه نیز، در متن مقاله توضیح داده شده است.

2- مواد و روش تولید

روش‌های تولید فوم‌های فلزی، در خلال سال‌های متمادی تنوع گسترده‌ای یافته است. در این میان، روش‌های ذوبی اهمیت بیشتری پیدا کرده‌اند. در تحقیق حاضر برای تولید نمونه‌های فوم آلومینیومی، از روش ذوبی با عامل فوم‌ساز (فوم‌سازی مستقیم از مذاب)[1] استفاده شده است. محصول این روش، یک فوم با قابلیت چکش‌خواری[2] و دارای ساختار سلول بسته[3] بوده که برای کاربردهای جذب انرژی ضربه، بسیار مناسب می‌باشد. همچنین در مقایسه با سایر روش‌های تولیدی، اندازه سلول‌ها و توزیع چگالی موضعی در فوم همگن‌تر می‌باشد [3].

در این پژوهش، آلیاژ آلومینیوم ریختگی A356 با ترکیب شیمیایی جدول 1، به‌عنوان فلز پایه انتخاب گردید. از ذرات تقویت‌کننده کاربید سیلیسیم SiC، با خلوص 98% وزنی و اندازه متوسط ذرات برابر با 10 میکرومتر، برای پایدارسازی مذاب (ویسکوزکننده مذاب) در فرآیند تولید فوم، استفاده شد. به‌منظور حذف گازهای جذب‌شده سطحی و در نتیجه، بهبود ترشوندگی ذرات SiC توسط مذاب آلومینیوم، این ذرات تحت فرآیند آماده‌سازی حرارتی قرار گرفت. این فرآیند، شامل حرارت‌دادن به مدت یک ساعت در دمای $950^{\circ}C$ و خنک کردن در داخل کوره و مجدداً حرارت دادن به مدت 2 ساعت در دمای $650^{\circ}C$ و خنک کردن در دمای محیط می‌باشد. پودر کربنات‌کلسیم $CaCO_3$، با خلوص 99.5% وزنی و اندازه متوسط 5 میکرومتر، به عنوان عامل فوم‌ساز استفاده شد. به منظور افزایش قدرت تجزیه ذرات $CaCO_3$ و توزیع مناسب آن در داخل مذاب، این ذرات تحت فرآیند آماده‌سازی حرارتی و خشک‌کردن قرار گرفت. حرارت‌دادن به مدت 2 ساعت در دمای $200^{\circ}C$ و سرمایش در دمای محیط صورت گرفت. انجام عملیات مذکور، باعث تشکیل یک لایه اکسیدی در مقیاس نانومتری، بر روی سطح ماده فوم‌ساز گردیده و این امر سبب می‌گردد که با هم‌زدن آن در داخل مذاب آلومینیوم، سریعاً و در مدت زمانی کوتاه فوم تولید شود.

برای تولید محصول فومی، ابتدا مذاب آلیاژ آلومینیوم در دمای $650\text{-}680^{\circ}C$ آماده و توسط سیستم همزن با سرعت تقریبی 900 دور بر دقیقه، هم زده شد. سپس ذرات SiC (به مقدار 10% حجمی)، طی مدت زمان 20 دقیقه و به تدریج وارد مذاب در حال اغتشاش شد (ریخته‌گری گردابی[4]). پس از آن مذاب کامپوزیتی، به داخل قالب‌های شمش تخلیه و منجمد گردید. "شکل 1"، مراحل تولید شمش کامپوزیتی را نشان می‌دهد.

[1] Direct Foaming Route of Melt using foaming agent
[2] Ductile
[3] Closed-cell
[4] Stir Casting

جدول 1 ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم A356

Table 1 The chemical composition of A356 aluminum alloy

ترکیب	Si	Mg	Fe	Cu	Ti	Zn	Mn
درصد وزنی	6.81	0.35	0.19	0.09	0.07	0.02	0.01

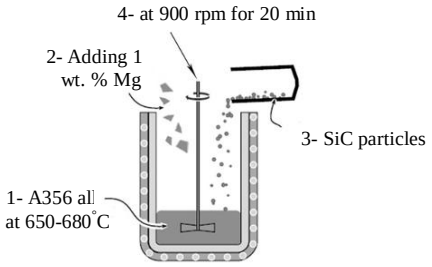

Fig. 1 The production of composite ingot

شکل 1 مراحل تولید شمش کامپوزیتی

در مرحله بعد ذوب مجدد شمش کامپوزیتی $A356/SiC_p$، در محدوده دمایی $670\text{-}700^{\circ}C$ و در داخل قالب فلزی صورت گرفت. مذاب با سرعت 1400 دور بر دقیقه و مداوماً هم زده شد تا حداکثر یکنواختی[5] حاصل شود. در این وضعیت پودر کربنات‌کلسیم $CaCO_3$ (به مقدار 3 درصد وزنی)، به‌عنوان عامل فوم‌ساز و در داخل فویل‌های آلومینیومی طی مدت زمان کوتاه (حدود یک دقیقه) وارد مذاب در حال هم‌زدن گردید. بلافاصله عمل فوم شدن شروع و با خروج همزن از داخل قالب، تکمیل شد. قالب از داخل کوره خارج و محصول متخلخل داخل آن، در دمای محیط سرد و منجمد شد [20]. "شکل 2"، مراحل تولید فوم کامپوزیتی با زمینه آلومنیوم را نشان می‌دهد. محصول فوم متخلخل تولید شده، یک فوم همگن و با ساختار سلول بسته می‌باشد. "شکل 3"، تصویری از فوم ساخته شده را نشان می‌دهد. اندازه سلول‌ها (مقدار متوسط) برابر با 3 mm، دانسیته نهایی فوم برابر با $0.5\ gr/cm^3$ و درصد تخلخل[6] برابر با 81% می‌باشد (درصد تخلخل فوم برابر است با $1-\rho_f/\rho_{Al}$ که ρ_f و ρ_{Al} به ترتیب چگالی فوم و چگالی آلومینیوم یعنی ماده زمینه فوم است). محصول فومی، به نمونه‌هایی به‌ابعاد 100 mm×100 mm×20 mm برش داده شد و جهت آزمایش ضربه آماده گردید.

3- طراحی و ساخت دستگاه ضربه

براساس طرح ماشین آزمون ضربه اینسترون دایناتاپ و نیز استاندارد ASTM D 3763 [21]، دستگاه آزمون ضربه سقوطی در مقیاس آزمایشگاهی طراحی و ساخته شد. "شکل 4"، نمای شماتیکی از دستگاه آزمایش را نشان می‌دهد.

روش آزمایش ضربه به‌صورت زیر است: نمونه فوم آلومینیوم، بین دو صفحه مربعی (دو صفحه صلب موازی) قرار می‌گیرد و به‌طور ثابت[7] بسته می‌شود، به‌گونه‌ای که نقطه ضربه، در وسط نمونه می‌باشد. هر یک از این دو صفحه (صفحات گیره[8])، دارای سوراخ دایره‌ای مرکزی به قطر 76 mm می‌باشد. چکش مورد استفاده، فولادی و با انتهای نیم‌کروی به قطر 13 mm می‌باشد. ضربه‌زن یا کوبه سقوط‌کننده[9] (شامل چکش ضارب و متعلقات آن) به جرم 4.7 kg، توسط مکانیزم چفتی کردن و نقاله[10] تا یک ارتفاع مشخص بالا برده می‌شود. سپس از آن ارتفاع، در امتداد دو ریل راهنما رها شده و روی

[5] Homogenization
[6] Porosity
[7] Fixed
[8] Clamp Plates
[9] Falling Ram (Crosshead)
[10] Latching and Hoist Mechanisms

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.7.11.6]

نمونه فومی می‌افتد. به وسیله سرعت‌سنج نصب‌شده بر روی دستگاه، سرعت ضربه در لحظه اصابت چکش با نمونه تعیین می‌شود (برابر 6.70 m/s). آزمایش ضربه، برای پنج نمونه تکرار شده است.

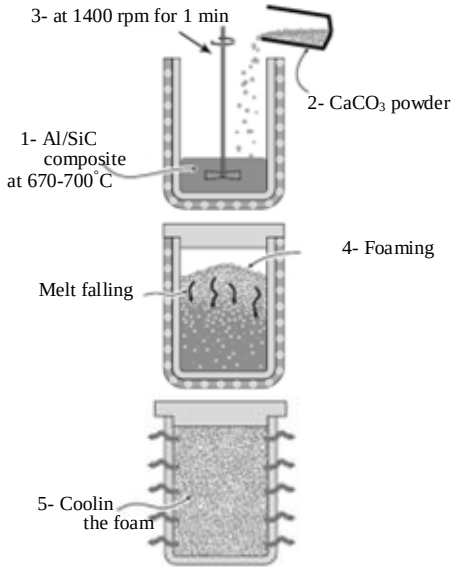

Fig. 2 The stages of foam production

شکل 2 مراحل تولید فوم

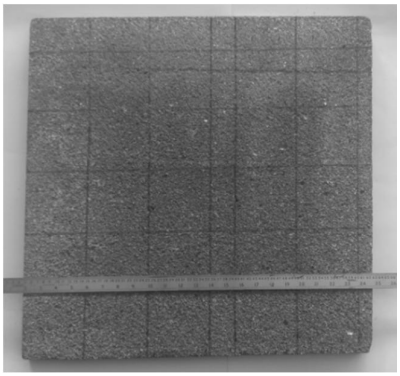

Fig. 3 A picture of foam product

شکل 3 تصویری از محصول فومی ساخته شده

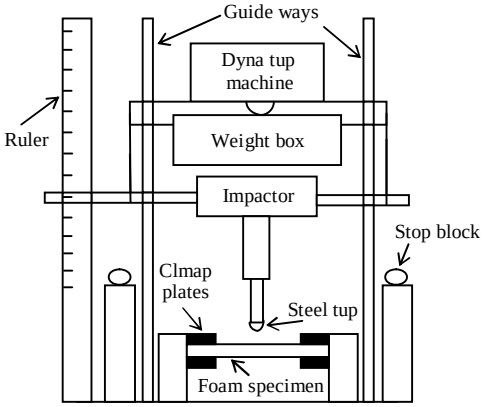

Fig. 4 Schematic view of the impact testing machine used in this work

شکل 4 نمای شماتیکی از دستگاه آزمایش ضربه ساخته‌شده در تحقیق حاضر

"شکل 5"، تصویری از دستگاه آزمایش را نشان می‌دهد. با اضافه کردن جرم موردنیاز و یا تغییر ارتفاع رها شدن ضربه‌زن، امکان اعمال انرژی ضربه با مقادیر مختلف وجود دارد. در "شکل 6"، نمونه فوم بعد از انجام آزمایش و نیز پلاگ جدا شده از آن (از دو نمای مختلف) نشان داده شده است. انرژی ضربه اعمالی برابر 105 J بوده و نمونه در اثر نفوذ کامل چکش، سوراخ شده است (حالت شکست ماده، به صورت پلاگ برشی[1] مشاهده شد). به‌منظور ثبت داده‌های مربوط به رفتار ضربه فوم، از شتاب‌سنج، لودسل و سنسور پیزوالکتریک استفاده شده که جزئیات آن در بخش‌های 3-1 تا 3-3 ارائه شده است.

3-1- نصب شتاب‌سنج بر روی چکش

سیستم اکتساب داده‌ها[2]، شامل شتاب‌سنج، اسیلوسکوپ و منبع تغذیه می‌باشد که مشخصات آن مطابق جدول 2 می‌باشد. تجهیزات مذکور، متعلق به آزمایشگاه ضربه دانشگاه بیرجند می‌باشد که از آن‌ها در کار حاضر استفاده شده است. سنسور شتاب (که تصویر آن در "شکل 7" مشاهده می‌شود)، بر روی چکش نصب شد و آزمایش ضربه بر روی تعدادی نمونه فوم انجام گردید. به محض اصابت چکش به نمونه، مقدار ولتاژ برحسب زمان گزارش شده و

Fig. 5 A picture of the drop-weight impact testing machine

شکل 5 تصویر دستگاه آزمایش ضربه سقوطی

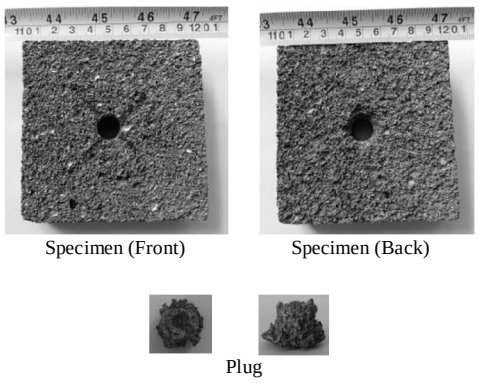

Fig. 6 Perfectly penetrated foam specimen and shear plug

شکل 6 نمونه فوم کاملاً سوراخ‌شده و پلاگ جدا شده از آن (از دو نمای مختلف)

[1] Shear-Plugging Fracture Mode
[2] Data Acquisition System

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.7.11.6]

توسط کامپیوتر ذخیره می‌گردد. "شکل 8" نمونه‌ای از نتایج آزمایش را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که سیگنال مربوط به سنسور شتاب، بسیار نویزی می‌باشد به‌گونه‌ای که ابتدای ضربه، انتهای ضربه و مقدار بار حداکثر[1] مشخص نیست. بنابراین به‌جای شتاب‌سنج، از لودسل استفاده شد.

2-3- طراحی و نصب مدار لودسل

مطابق "شکل‌های 9، 10 و 11"، طراحی و نصب مدار کامل نیروسنج[2] دینامیکی جهت دستگاه آزمون ضربه سقوطی انجام گرفت. این مدار، شامل کرنش‌سنج (نصب شده بر روی چکش)، تقویت‌کننده ولتاژ[3] (شکل 9) و اسیلوسکوپ (تک‌ترونیکس[4] TDS 1012B) می‌باشد که به‌منظور اندازه‌گیری نیروی ضربه برحسب زمان، استفاده می‌گردد. طراحی مدار، با استفاده از پل وتستون[5] انجام شده و چهار کرنش‌سنج HBM (از نوع LY11 3/350) بر روی چکش چسبانده شده‌اند [22]. "شکل 10"، نحوه آرایش کرنش‌سنج‌ها روی میله تحت فشار، در مدار پل وتستون را نشان می‌دهد. پس از چسباندن کرنش‌سنج‌ها و نیز ترمینال‌های مربوطه، لحیم‌کاری سیم‌های رابط انجام گرفته است. "شکل 11"، جزئیات نصب کرنش‌سنج‌ها را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، در هر سمت چکش دو کرنش‌سنج 350 اهمی ، یکی در جهت محوری و دیگری در جهت عمود بر محور اصلی قرار می‌گیرند. در شکل سمت راست، کرنش‌سنج‌ها برای یک سمت چکش (شماره‌های 1 و 2) و در شکل سمت چپ، کرنش‌سنج‌ها برای

جدول 2 مشخصات سیستم اکتساب داده

Table 2 The data acquisition system characteristics

نام	مدل
سنسور شتاب	کیستلر 8742A10 با حساسیت 0.5 mV/*g*
اسیلوسکوپ	تک‌ترونیکس TDS 1012B
منبع تغذیه	کوپلر کیستلر نوع 5114

Fig. 7 The accelerometer used in this work

شکل 7 سنسور شتاب مورد استفاده

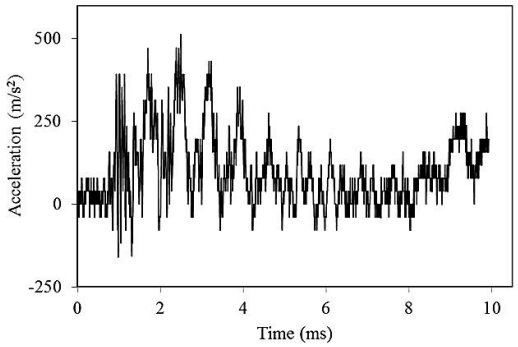

Fig. 8 The acceleration-time data

شکل 8 داده‌های شتاب برحسب زمان

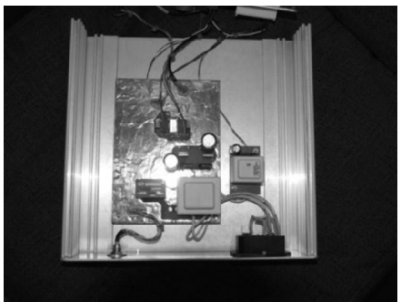

Fig. 9 The details of dynamic load-cell circuit

شکل 9 جزئیات مدار نیروسنج دینامیکی

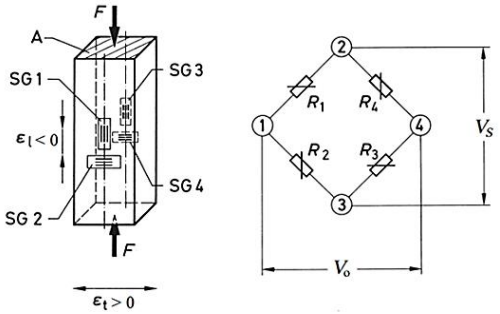

Fig. 10 Arrangement of the strain gages on the compression bar and in the Wheatstone bridge circuit [22]

شکل 10 نحوه چیدمان کرنش‌سنج‌ها روی میله تحت فشار،در مدار پل وتستون [22]

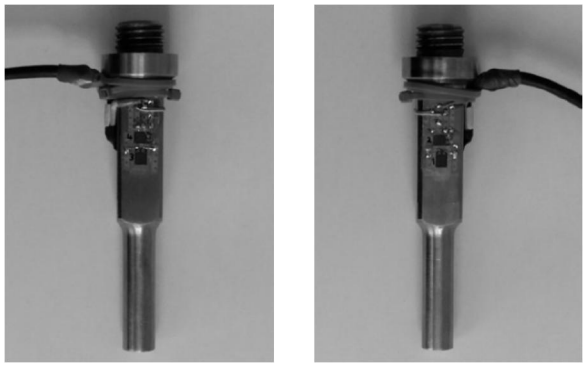

Fig. 11 The strain gages mounted on the impactor

شکل 11 نصب کرنش‌سنج بر روی چکش ضارب

سمت دیگر چکش (شماره‌های 3 و 4) نشان داده شده‌اند که نحوه شماره‌گذاری آن‌ها، همانند "شکل 10" می‌باشد.

هنگام انجام آزمایش ضربه، به محض این‌که چکش به نمونه فوم اصابت می‌کند، سیگنال ارسالی از سوی سنسور (که همان ولتاژ خروجی پل *Vo* می‌باشد) توسط سیستم اکتساب داده‌ها جمع‌آوری شده و تغییرات ولتاژ برحسب زمان ضربه، در کامپیوتر ذخیره می‌گردد. با استفاده از روابط حاکم بر پل وتستونی که در هر چهار بازوی آن از کرنش‌سنج استفاده شده (مدار پل کامل) و کرنش‌های جانبی نیز به حساب می‌آیند، می‌توان تغییرات کرنش-زمان و نهایتاً تغییرات نیرو-زمان را به‌دست آورد [22]. با انتگرال‌گیری عددی از تاریخچه شتاب (که با داشتن نیرو و جرم ضربه‌زن به‌دست می‌آید)، مقادیر سینماتیکی مربوطه مانند سرعت و تغییرمکان محاسبه شده و بنابراین انرژی جذب شده توسط فوم، با توجه به سطح زیر نمودار نیرو-تغییرمکان تعیین می‌شود.

[1] Peak Load
[2] Load-cell
[3] Amplifier
[4] Tektronix
[5] Wheatstone Bridge

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.7.11.6]

آزمایش ضربه سقوطی در دفعات بسیار متعدد انجام گرفت. مشاهده شد که مدار لودسل برای آلومینیوم توده‌ای[1] (و مواد دیگر)، سیگنال خروجی دارد ولی برای فوم آلومینیوم خروجی ندارد. حتی با تغییر مقدار گین[2] به 100 که دامنه سیگنال خروجی پل صد برابر می‌شود، نیز سیگنالی بر روی صفحه اسیلوسکوپ مشاهده نشد.

چکش اولیه، از جنس فولاد و دارای مقطع توپر بود که در اثر نیروی ضربه وارده بر فوم تحریک نمی‌شد و کرنش بسیار کوچکی در کرنش‌سنج‌ها ایجاد می‌شد که توسط سیستم اکتساب داده‌ها قابل اندازه‌گیری نبود. بنابراین یک چکش جدید از جنس آلومینیوم و با مقطع توخالی طراحی گردید و مجدداً کرنش‌سنج‌ها بر روی آن چسبانده شد. مشکل رفع، و آزمایش با موفقیت انجام شد.

"شکل 12"، نمونه‌ای از نتایج حاصل از آزمایش ضربه بر روی فوم توسط چکش جدید را نشان می‌دهد که این نتایج، توسط مدار لودسل و نیز شتاب‌سنج گزارش شده است (تنظیمات محور عمودی، برای دو سنسور متفاوت می‌باشد). ملاحظه می‌شود که خروجی گزارش شده توسط شتاب‌سنج بسیار نویزی می‌باشد، در حالی‌که خروجی گزارش شده توسط مدار لودسل یک نمودار صاف و مناسب است که رفتار ضربه را به خوبی نشان می‌دهد.

به‌منظور کالیبره‌کردن دستگاه و تعیین ضریب تبدیل ولتاژ به نیرو، مطابق "شکل 13" آزمایش ضربه سقوطی بر روی یک نمونه فوم انجام شد، که در آن چکش ضارب به طور کامل به درون نمونه نفوذ نکرده و متوقف شده است. با داشتن جرم ضربه‌زن m و نیز سرعت ضربه در لحظه اصابت چکش به نمونه v_1 (که از روی صفحه سرعت‌سنج خوانده می‌شود)، مقدار تغییر تکانه‌خطی یا مومنتم اعمال‌شده از رابطه‌ی mv_1 معلوم می‌شود. سرعت نهایی چکش برابر صفر فرض می‌شود و لذا مقدار تغییرات سرعت، با مقدار سرعت ضربه در زمان t=0 برابر است.

از سوی دیگر، همان‌طور که در "شکل 13" مشاهده می‌شود، نمونه فوم سوراخ نشده است. بنابراین تمام انرژی ضربه و اندازه حرکت، توسط فوم جذب شده است. حال کافی است سطح زیر نمودار نیرو- زمان (از زمان شروع ضربه تا زمان پایان ضربه) محاسبه شده و مساوی با تغییرات تکانه اعمالی قرار داده شود، یعنی:

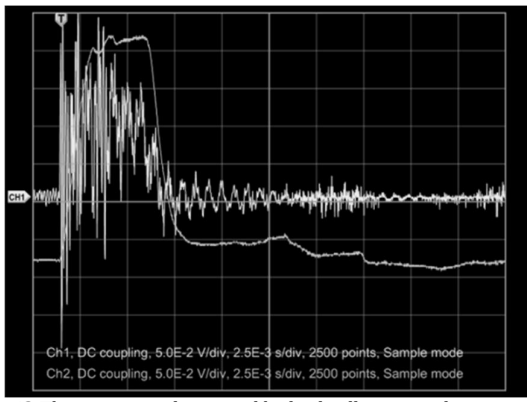

Fig. 12 The output signals reported by load-cell circuit and accelerometer for aluminum foam

شکل 12 خروجی گزارش‌شده توسط مدار لودسل برای فوم آلومینیوم، با استفاده از چکش جدید

[1] Bulk Aluminum Alloy
[2] Gain

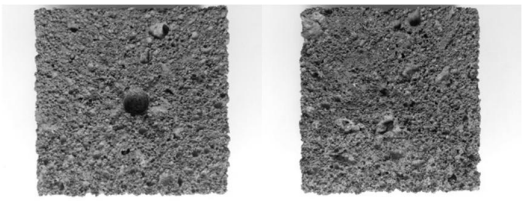

Fig. 13 The foam specimen under impact (front and back view)

شکل 13 نمونه فوم تحت ضربه (جلو و پشت نمونه)

$$\int F\,dt = m\,v_1 \qquad (1)$$

با توجه به این‌که یک رابطه خطی بین نیروی F و ولتاژ V وجود دارد [22]، بنابراین:

$$\beta \int V\,dt = m\,v_1 \qquad (2)$$

و در نتیجه با توجه به تساوی بالا، ضریب تبدیل ولتاژ به نیرو (β) به‌دست می‌آید. لازم به ذکر است که سمت چپ رابطه فوق، با استفاده از انتگرال‌گیری عددی از داده‌های ولتاژ خروجی مدار لودسل، محاسبه شده است.

3-3- استفاده از یک نیروسنج پیزوالکتریک

پس از جستجوهای مکرر، یک نیروسنج استاندارد (مدل YMC511F03) از خارج از کشور، تهیه و خریداری گردید ("شکل 14"، تصویر سمت چپ). این سنسور، از نوع پیزوالکتریک[3] بوده که در اثر شوک ناشی از ضربه، ولتاژ آزاد می‌کند و جهت اندازه‌گیری نیروی فشاری به‌صورت دینامیکی (با ظرفیت 5 کیلونیوتن) مورد استفاده قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که سنسور نیرو، مستقیماً به اسیلوسکوپ متصل نمی‌شود و معمولاً از شارژ آمپلی‌فایر و یا سیگنال‌کاندیشنر[4]، به‌عنوان یک واسطه در مدار استفاده می‌گردد. تصویر سمت راست در "شکل 14"، سیگنال‌کاندیشنر مورد استفاده (مدل YMC 8201) را نشان می‌دهد.

"شکل 15"، تصویر دستگاه آزمون ضربه سقوطی و سیستم اکتساب داده‌ها را نشان می‌دهد. شماره‌های مشخص‌شده در شکل، عبارتند از: 1: مکانیزم نقاله، 2: مکانیزم چفتی‌کردن، 3: محل اضافه کردن وزنه، 4: زائده‌ی نصب‌شده روی ضربه‌زن (که از جلوی سنسور عبور کرده و سرعت ضربه در لحظه اصابت چکش به نمونه ثبت می‌شود)، 5: ضربه‌زن، 6: چکش، 7: خط‌کش، 8: ریل‌های راهنما، 9: موتور بالابر، 10: سرعت‌سنج (سنسور)، 11: صفحات کلمپ (گیره)، 12: نمونه فوم، 13: ضربه‌گیر، 14: نمایش‌گر سرعت ضربه، 15: اتصال بدنه دستگاه به چاه ارت، 16: آمپلی‌فایر، 17: سیگنال کاندیشنر، 18: اسیلوسکوپ، 19: کامپیوتر.

"شکل 16"، محل نصب سنسور پیزوالکتریک و کرنش‌سنج‌ها و نیز نحوه اتصال چکش به ضربه‌زن را نشان می‌دهد. شماره‌های مشخص شده در شکل، عبارتند از: 1: ضربه‌زن (کوبه سقوط‌کننده)، 2: سنسور نیرو (سنسور پیزوالکتریک)، 3: تبدیل واسط[5] (فیکسچر) جهت قرارگیری سنسور نیرو در فاصله بین چکش و کوبه، 4: محل چسباندن کرنش‌سنج‌ها روی بدنه چکش، 5: فرورونده[6]، 6: نوک نیم‌کروی شکل (ملحق شده به انتهای چکش).

لازم به ذکر است که در زیر کوبه سقوط کننده، یک زائده تعبیه شده است. قسمت پایین این زائده، درون سنسور نیرو قرار می‌گیرد و قسمت بالای

[3] Piezoelectric
[4] Signal Conditioner
[5] Interface
[6] Indenter

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.7.11.6]

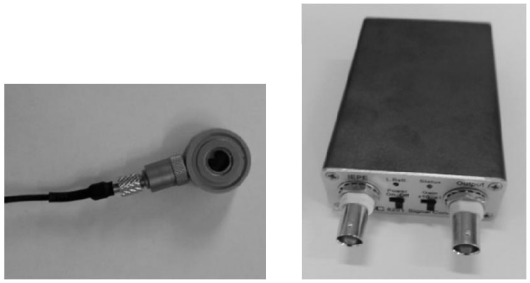

Fig. 14 A piezoelectric dynamic force sensor (left) and signal conditioner (right)

شکل 14 نیروسنج پیزوالکتریک (تصویر سمت چپ) و سیگنال کاندیشنر (تصویر سمت راست)

Fig. 15 A picture of the drop-weight impact testing machine and the data acquisition system (the experimental set up)

شکل 15 تصویر دستگاه آزمون ضربه سقوطی و سیستم اکتساب داده‌ها

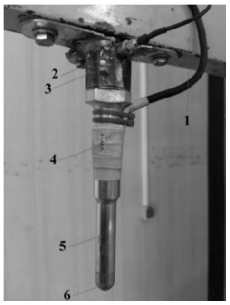

Fig. 16 Force sensor and strain gages mounted on the striker

شکل 16 سنسور نیرو و کرنش‌سنج‌ها بر روی چکش جدید (آلومینیومی)

آن که مخروطی‌شکل است، بر روی سطح بالایی سنسور می‌نشیند. بنابراین در طی ضربه، سنسور نیرو از هر دو سمت (هم از قسمتی که به کوبه یا ضربه‌زن متصل است و هم از قسمتی که به چکش متصل است) تحت فشار قرار می‌گیرد.

4- نتایج و بحث

"شکل 17"، نتایج آزمایشگاهی تغییرات بار (نیروی ضربه) برحسب زمان برای فوم کامپوزیتی $A356/SiC_p$ را نشان می‌دهد. نتایج نشان داده شده در شکل، نتایج گزارش شده توسط هر دو سنسور (یعنی لودسل طراحی شده براساس پل وتستون و نیروسنج تجاری پیزوالکتریک) می‌باشد. ضربه به مدت 4.45 میلی‌ثانیه به طول انجامیده است و در لحظه t=4.45 ms ، مقدار نیرو به صفر رسیده است. داده‌های پس از آن، زائد بوده و در نتایج بعدی حذف شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، نتایج دو سنسور (روند تغییرات و نیروی ماکزیمم) با یکدیگر مطابقت دارد. این نشان می‌دهد که کالیبره کردن کرنش‌سنج‌ها در مدار لودسل، به درستی انجام شده است. نکته لازم به ذکر در "شکل 17"، نوسانی بودن پاسخ به‌دست آمده از سنسور پیزوالکتریک می‌باشد، که علت آن احتمالاً مربوط به وجود ارتعاش در پایه اتصال سنسور به چکش و بدنه می‌باشد. این اتصال مطابق "شکل 16"، توسط یک ورق ارتجاعی انجام شده که تا حدی باعث ارتعاش شده و نیاز به اصلاح محل اتصال خواهد داشت.

"شکل‌های 18 و 19"، نتایج تغییرات بار (نیروی ضربه) برحسب زمان و بار برحسب تغییرمکان را نشان می‌دهند. تغییرمکان جابجا شده توسط نمونه فوم، معادل عمق نفوذ چکش (ضارب) می‌باشد. پاسخ ضربه سرعت‌پایین فوم آلومینیومی $A356/SiC_p$، می‌تواند به سه ناحیه تقسیم شود: 1- ناحیه الاستیک، 2- ناحیه بار پلاتو و 3- ناحیه شکست کامل. در ابتدا نیرو، به‌طور تقریباً خطی افزایش می‌یابد تا این‌که به یک مقدار حداکثر اولیه[1] می‌رسد. این امر، مقاومت سلول‌های فوم در برابر نفوذ را نشان می‌دهد. سپس ناحیه بار پلاتو[2] مشاهده می‌شود. در حقیقت، ساختار سلولی ماده سبب می‌شود که فوم بتواند قبل از شکست، تغییرشکل‌های پلاستیک را در یک بار تقریباً ثابت (بار پلاتو) تحمل کند و لذا بخش قابل‌توجهی از انرژی ضربه جذب شده، مربوط به ناحیه پلاتو می‌باشد. نهایتاً، نیرو با زمان کاهش یافته و هنگام نفوذ کامل چکش به داخل نمونه فوم، به صفر می‌رسد. مقدار بار پلاتو (متوسط مقادیر نیرو در ناحیه پلاتو)، برابر با 1.62 kN برای لودسل و برابر با 1.65 kN برای سنسور پیزوالکتریک می‌باشد که 1.8 درصد اختلاف را نشان می‌دهد.

در "شکل 20"، نمودار تغییرات انرژی جذب شده توسط فوم برحسب زمان ضربه نشان داده شده است. با گذشت زمان، انرژی ضربه جذب شده به تدریج افزایش می‌یابد، تا این‌که به یک مقدار حداکثر می‌رسد. این مقدار حداکثر به عنوان انرژی جذب شده کل توسط فوم آلومینیوم، تلقی می‌شود و مقدار آن برابر با 22.04 J برای لودسل می‌باشد؛ این مقدار برای سنسور پیزوالکتریک، برابر 20.45 J است. بنابراین ظرفیت جذب انرژی برآورد شده توسط دو سنسور، به میزان 7.7 درصد اختلاف دارد. شکستگی منحنی جذب انرژی در مورد سنسور پیزوالکتریک، مربوط به ارتعاشات پایه اتصال سنسور

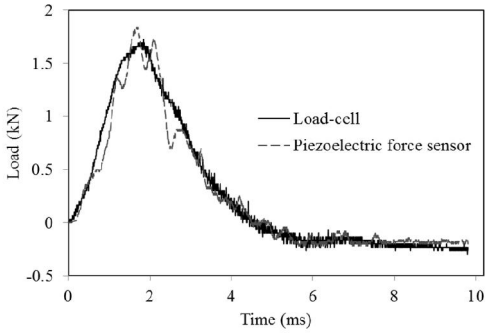

Fig. 17 The load as a function of time for $A356/SiC_p$ composite foam reported by two different sensors

شکل 17 تغییرات نیرو (بار) برحسب زمان برای فوم کامپوزیتی $A356/SiC_p$، گزارش‌شده توسط دو سنسور مختلف

[1] Initial Peak Load
[2] Plateau of Load Region

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.7.11.6]

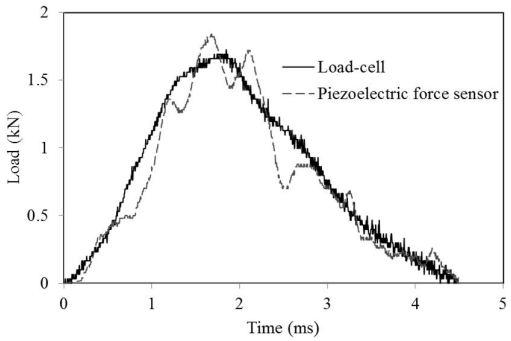

Fig. 18 The load-time history data obtained from the experiment (load-cell and piezoelectric force sensor)

شکل 18 داده‌های تجربی نیرو (بار) برحسب زمان مربوط به مدار لودسل و سنسور پیزوالکتریک

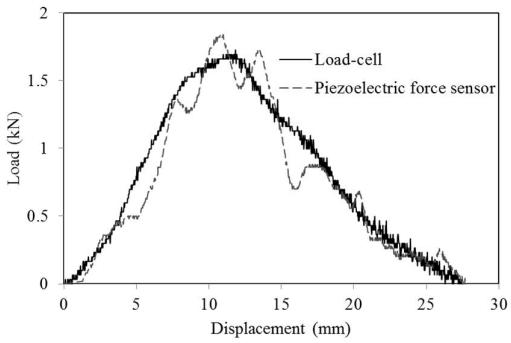

Fig. 19 The load versus displacement (impactor penetration depth)

شکل 19 تغییرات نیرو برحسب تغییرمکان (عمق نفوذ ضارب)

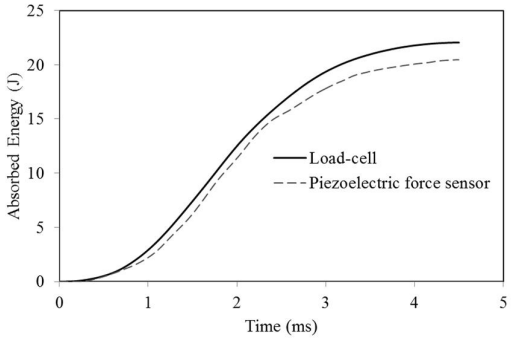

Fig. 20 The absorbed energy versus time history for aluminum foam

شکل 20 نمودار انرژی جذب‌شده برحسب زمان برای فوم آلومینیوم

می‌باشد. حالت‌های مختلف تغییرشکل فوم که باعث جذب انرژی در طی ضربه می‌گردد، شامل خمش و فروپاشی دیواره‌های سلول فوم، لهیدگی سلول‌های فوم در زیر نوک چکش و نیز پارگی سلول‌های پیرامون ضارب می‌باشد [11].

همان‌طور که قبلاً ذکر شد، چکش ضارب به‌طور کامل به درون نمونه فوم نفوذ کرده، نمونه سوراخ شده و پلاگ برشی نیز مشاهده می‌شود (شکل 6). بنابراین انرژی جذب شده توسط فوم از انرژی ضربه اعمالی (105 ژول) کمتر است. در حقیقت انرژی ضربه اضافی که توسط فوم جذب نمی‌شود، در ضربه‌زن باقی می‌ماند، هم‌چنان‌که چکش نفوذکننده بعد از صفحه فومی جابجا می‌شود[1].

گفته شد که پاسخ ضربه فوم A356 دارای سه مرحله است (شکل 18). در منحنی "شکل 20" ملاحظه می‌شود که نرخ انرژی جذب‌شده[2] توسط فوم، در مرحله اول (ناحیه الاستیک) افزایش می‌یابد، در مرحله دوم (ناحیه پلاتو) ثابت است و در مرحله سوم (شکست فوم) کاهش می‌یابد.

در جدول 3 اطلاعات به‌دست آمده از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی (مربوط به مدار لودسل)، شامل زمان، تغییر مکان چکش، نیروی ضربه و انرژی جذب شده در نقاط خاصی از نمودار نیرو- زمان ارائه شده است. این نقاط عبارتند از: 1- نقطه پایان ناحیه الاستیک و شروع ناحیه پلاتو، 2- نقطه پایان ناحیه پلاتو و شروع ناحیه شکست، 3- نقطه پایان آزمایش که در آن، ضربه به اتمام رسیده و نیرو برابر با صفر می‌شود. مرحله اول یعنی ناحیه الاستیک، طی مدت 1.36 میلی‌ثانیه طول می‌کشد. بار پیک اولیه که در زمان t=1.36 ms اتفاق می‌افتد، برابر با 1.56 kN می‌باشد. مرحله دوم (ناحیه پلاتو) که در آن، چکش ضارب در فوم تغییرشکل ایجاد می‌کند در زمان t=2.01 ms پایان می‌یابد و بنابراین ناحیه بار پلاتو، طی مدت 0.65 میلی‌ثانیه به طول می‌انجامد. در لحظه‌ای که مرحله سوم آغاز می‌شود (t=2.01 ms)، نرخ انرژی جذب شده شروع به کاهش‌یافتن می‌کند. این، یعنی آن‌که مقاومت سلول‌های فوم در برابر نفوذ، روبه زوال می‌رود و در نتیجه، مقدار نیرو کاهش یافته تا در نهایت به صفر برسد.

همچنین با توجه به جدول 3، ناحیه بار پلاتو در تغییرمکان 8.81 mm شروع و در تغییرمکان 12.87 mm پایان می‌یابد. بنابراین یک ناحیه پلاتو با 4.06 mm تغییرمکان مشاهده می‌شود. مقدار (و درصد) انرژی جذب شده در ناحیه الاستیک برابر با 6.07 J (27.5%)، در ناحیه پلاتو برابر با 6.58 J (29.9%) و در ناحیه شکست برابر با 9.39 J (42.6%) می‌باشد که در مجموع، 22.04 ژول انرژی توسط ماده جذب شده است.

در "شکل 21"، نتایج کار حاضر با نتایج تجربی گزارش شده توسط موهان و همکاران [11] مقایسه شده است. در این شکل، نمودار تغییرات نیرو برحسب زمان و انرژی جذب‌شده برحسب زمان، برای فوم آلومینیوم با ضخامت‌های مختلف 20 mm، 30 mm و 40 mm تحت ضربه سقوطی نشان داده شده است. ضخامت فوم در کار حاضر، برابر با 20 mm می‌باشد. مقیاس محورها طوری در نظر گرفته شده که مقایسه دو نمودار، بهتر صورت گیرد. ملاحظه می‌شود که زمان ضربه، تقریباً در هر دو نمودار یکسان می‌باشد. نکته حائز اهمیت در "شکل 21"، هم‌خوانی رفتار ماده در دو نمودار (کار حاضر و کار موهان) می‌باشد. همچنین پاسخ به‌دست آمده برای ماده فوم مطالعه شده در کار حاضر، یک پاسخ پایدار[3] و کم‌نوسان (حداکثر با 5.8% نوسان)

جدول 3 اطلاعات به‌دست آمده از آزمایش ضربه برای فوم کامپوزیتی $A356/SiC_p$

Table 3 The impact test data for $A356/SiC_p$ composite foam

کمیت	در نقطه پایان ناحیه الاستیک و شروع ناحیه پلاتو	در نقطه پایان ناحیه پلاتو و شروع ناحیه شکست	در پایان ضربه
زمان (ms)	1.36	2.01	4.45
تغییرمکان (mm)	8.81	12.87	27.5
نیرو (kN)	1.56	1.56	0
انرژی (J)	6.07	12.65	22.04

[1] Moves Past the Foam Plate
[2] The Rate of Energy Absorbed by the foam
[3] Stable Response

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.7.11.6]

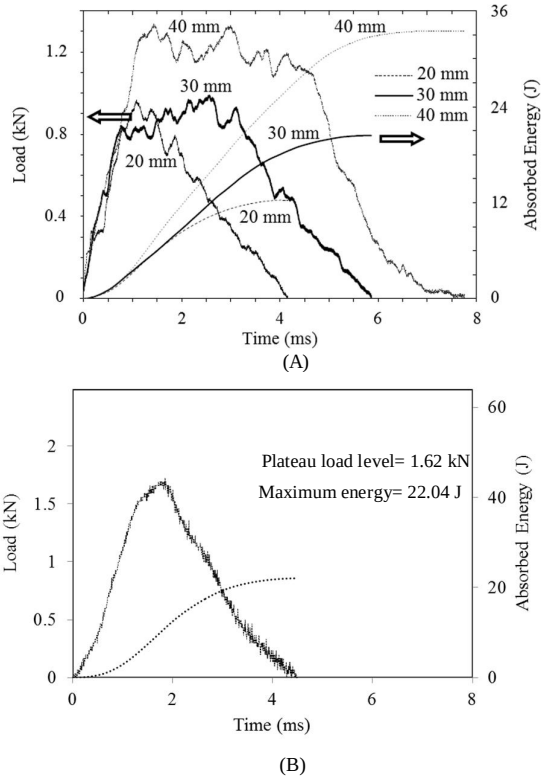

Fig. 21 Comparison of absorbed energy and load versus time for aluminum foam under impact loading: (A) results reported by Mohan et al. [11], (B) results of this work

شکل 21 مقایسه انرژی جذب‌شده و نیرو برحسب زمان برای فوم آلومینیوم تحت بار ضربه‌ای: (الف) نتایج گزارش شده توسط موهان و همکاران [11]، (ب) نتایج کار حاضر

می‌باشد. موارد ذکرشده، بر قابل اطمینان بودن خروجی ماشین ضربه دلالت دارد.

ماده بررسی شده در کار موهان و همکاران [11]، یک فوم آلومینیوم معمولی و فاقد ذرات SiC می‌باشد؛ اما ماده بررسی شده در تحقیق حاضر، فوم آلومینیوم A356 تقویت شده با ذرات SiC (فوم کامپوزیتی $A356/SiC_p$) می‌باشد. بنابراین با توجه به "شکل 21"، مقدار بار پلاتو و نیز ظرفیت جذب انرژی در ماده بررسی شده در کار حاضر بیشتر است (به دلیل وجود ذرات SiC در ماده). لی و همکاران [23]، نیز خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم A356 تقویت شده توسط ذرات SiC را در شرایط بارگذاری استاتیکی مطالعه نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزودن ذرات SiC، به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای باعث افزایش استحکام تسلیم[1] ماده (با 100% افزایش) می‌گردد. مقایسه نمودارهای نیرو- زمان در فوم آلومینیوم بدون SiC (کار موهان) و فوم آلومینیوم با SiC (کار حاضر) در "شکل 21"، نشان می‌دهد که برای ماده مطالعه شده در کار حاضر، مقدار بار پلاتو به میزان 80% و ظرفیت جذب انرژی فوم به میزان 84% افزایش دارد.

5- نتیجه‌گیری

در کار حاضر، نمونه‌های فوم کامپوزیتی آلومینیوم $A356/SiC_p$، با استفاده از روش ذوبی به کمک عامل فوم‌ساز تولید شد. دستگاه آزمون ضربه سقوطی، براساس استانداردهای موجود طراحی، ساخته و کالیبره شد. سپس رفتار نمونه‌های فومی تحت ضربه سقوطی با سرعت پایین، به طور تجربی بررسی شد.

کالیبره‌کردن دستگاه آزمایش ضربه اولاً بر روی همان ماده مورد مطالعه (فوم کامپوزیتی $A356/SiC_p$) اجرا شده و ثانیاً مطابق با شرایط آزمایش ضربه که بر روی نمونه‌های اصلی انجام گرفته، می‌باشد. با توجه به این‌که در کار حاضر، رفتار دینامیکی ماده فوم بررسی گردیده است، لذا انجام کالیبراسیون به صورت دینامیکی و مطابق شرایط ذکرشده در فوق، اکیداً توصیه می‌شود.

به منظور ثبت داده‌های نیرو در طی زمان ضربه، از سه سنسور مختلف (شتاب‌سنج، لودسل و سنسور پیزوالکتریک) استفاده شد. به‌دلیل نویزی بودن سیگنال گزارش‌شده توسط شتاب‌سنج، مدار لودسل جهت دستگاه ضربه طراحی و نصب گردید. با توجه به عدم گزارش ولتاژ توسط مدار لودسل (برای آزمایش ضربه بر روی فوم)، جنس و مقطع چکش اصلاح گردید و مجدداً کرنش‌سنج‌ها بر روی چکش جدید چسبانده شد. مشکل رفع، و آزمایش با موفقیت انجام شد.

نتایج حاصل از لودسل طراحی شده براساس پل وتستون، با نتایج به‌دست آمده از سنسور تجاری پیزوالکتریک (نیروسنج دینامیکی) مقایسه و صحت‌سنجی شد. مقدار بار پلاتو (متوسط مقادیر نیرو در ناحیه پلاتو) و انرژی جذب شده توسط فوم، به ترتیب برابر با 1.62 kN و 22.04 J توسط لودسل و برابر با 1.65 kN و 20.45 J توسط سنسور پیزوالکتریک برآورد شده است که در مقایسه با یکدیگر، 1.8 و 7.7 درصد اختلاف را نشان می‌دهد.

به‌دست آوردن یک پاسخ ضربه کم‌نوسان (حداکثر با 5.8% نوسان) و پایدار برای ماده فوم و نیز هم‌خوانی رفتار ماده با نتایج مقالات دیگر، دلالت بر طراحی مناسب ماشین و خروجی قابل اعتماد آن دارد. مقایسه با نتایج محققان دیگر، نشان داد که به‌دلیل وجود ذرات سرامیکی تقویت‌کننده SiC (کاربید سیلیسیم) در ماده زمینه فوم، مقدار استحکام پلاتو و نیز ظرفیت جذب انرژی ماده (در کار حاضر) بیشتر است. بنابراین افزودن ذرات SiC، می‌تواند به عنوان یک رویکرد مناسب و با هدف بهبود خواص مکانیکی فوم و افزایش مقاومت به ضربه آن، مورد بررسی قرار گیرد. این رویکرد، به خصوص زمانی اهمیت دارد که از فوم آلومینیوم، در کاربردهای جذب انرژی استفاده شود.

نتایج آزمایش نشان داد که پاسخ ضربه فوم آلومینیومی (نمودار تغییرات نیرو برحسب زمان)، شامل سه مرحله است: رفتار خطی یا الاستیک، محدوده بار پلاتو و ناحیه شکست فوم. در نمودار جذب انرژی فوم نیز، این سه مرحله مشاهده می‌شود که در آن نرخ انرژی جذب شده، به ترتیب افزایش می‌یابد، ثابت است و کاهش می‌یابد. این رفتار ماده دلالت بر آن دارد که در مرحله اول فوم در مقابل ضربه مقاومت می‌کند، در مرحله دوم در فوم تغییرشکل پلاستیک ایجاد می‌شود و در مرحله سوم مقاومت فوم در برابر ضربه کاهش یافته تا اینکه نهایتاً شکست ماده اتفاق می‌افتد. بنابراین می‌توان گفت که رفتار جذب انرژی فوم نسبت به زمان، به صورت تجمعی می‌باشد. به بیان دیگر، در هر مرحله و به تدریج، میزان جذب انرژی با زمان افزایش یافته تا اینکه به حداکثر مقدار خود برسد.

رفتار مکانیکی فوم $A356/SiC_p$ تحت ضربه نشان داد که این ماده سلولی، انتخاب مناسبی در طراحی جاذب‌های انرژی می‌باشد. در ناحیه پلاتو، فوم می‌تواند تغییرشکل‌های پلاستیک را در یک بار تقریباً ثابت تحمل نماید. برای فوم با ضخامت 20 mm که در پژوهش حاضر بررسی شده است، 30 درصد از کل انرژی جذب شده مربوط به ناحیه پلاتو می‌باشد. مسلماً استفاده

[1] Yield Strength

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.7.11.6]

از فوم با ضخامت‌های بیشتر، منجر به بروز ناحیه پلاتو طولانی‌تر و افزایش ظرفیت جذب انرژی ماده خواهد شد.

با توجه به عدم وجود داده‌های آزمایش ضربه بر روی فوم $A356/SiC_p$، از نتایج این پژوهش می‌توان جهت توسعه مواد کامپوزیتی پیشرفته در کاربردهای صنعتی استفاده کرد.

6- تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله، مراتب سپاس و قدردانی خود را از آقای دکتر سید حجت هاشمی، بابت در اختیار قراردادن تجهیزات آزمایشگاه ضربه و نیز همکاری بی‌دریغ ایشان در انجام آزمایش‌ها ابراز می‌دارند.

7- مراجع

[1] H. Ahmadi, Gh. H. Liaghat, M. M. shokrieh, Experimental investigation of fabrication parameters' effects on the mechanical properties of epoxy/ceramic microballoon syntactic foams, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 2, pp. 47-54, 2014. (in Persian فارسی)

[2] M. F. Ashby, A. G. Evans, N. A. Fleck, L. J. Gibson, J. W. Hutchinson, H. N. G. Wadley, *Metal Foams: a Design Guide*, Boston, Butterworth: Heinemann, 2000.

[3] J. Banhart, Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams, *Progress in Materials Science*, Vol. 46, No. 6, pp. 559-632, 2001.

[4] N. Michailidis, F. Stergioudi, A. Tsouknidas, Deformation and energy absorption properties of powder-metallurgy produced Al foams, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 528, No. 24, pp. 7222-7227, 2011.

[5] M. Alizadeh, M. Mirzaei-Aliabadi, Compressive properties and energy absorption behavior of $Al–Al_2O_3$ composite foam synthesized by space-holder technique, *Materials & Design*, Vol. 35, pp. 419-424, 2012.

[6] T. Mukai, H. Kanahashi, T. Miyoshi, M. Mabuchi, T. G. Nieh, K. Higashi, Experimental study of energy absorption in a close-celled aluminum foam under dynamic loading, *Scripta Materialia*, Vol. 40, No. 8, pp. 921-927, 1999.

[7] V. S. Deshpande, N. A. Fleck, High strain rate compressive behaviour of aluminium alloy foams, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 24, No. 3, pp. 277-298, 2000.

[8] K. A. Dannemann, J. Lankford Jr, High strain rate compression of closed-cell aluminium foams, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 293, No. 1-2, pp. 157-164, 2000.

[9] T. Mukai, T. Miyoshi, S. Nakano, H. Somekawa, K. Higashi, Compressive response of a closed-cell aluminum foam at high strain rate, *Scripta Materialia*, Vol. 54, No. 4, pp. 533-537, 2006.

[10] J. Gassan, W. Harwick, D. Girlich, Behavior of aluminum foams under quasi-static and crash loadings, *Journal of Materials Science Letters*, Vol. 20, No. 11, pp. 1047-1048, 2001.

[11] K. Mohan, T. H. Yip, S. Idapalapati, Z. Chen, Impact response of aluminum foam core sandwich structures, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 529, pp. 94-101, 2011.

[12] J. U. Cho, S. J. Hong, S. K. Lee, C. Cho, Impact fracture behavior at the material of aluminum foam, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 539, pp. 250-258, 2012.

[13] G. Castro, S. R. Nutt, X. Wenchen, Compression and low-velocity impact behavior of aluminum syntactic foam, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 578, pp. 222-229, 2013.

[14] M. S. Han, S. O. Bang, J. U. Cho, S. Lee, C. Cho, Experimental study on the impact characteristics of a sandwich composite with an aluminum foam core, *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 14, No. 1, pp. 61-66, 2013.

[15] C. Hosun, C. Jaeung, Damage and penetration behavior of aluminum foam at various impacts, *Journal of Central South University*, Vol. 21, No. 9, pp. 3442-3448, 2014.

[16] S. Ramachandra, P. Sudheer Kumar, U. Ramamurty, Impact energy absorption in an Al foam at low velocities, *Scripta Materialia*, Vol. 49, No. 8, pp. 741-745, 2003.

[17] L. Peroni, M. Avalle, M. Peroni, The mechanical behaviour of aluminium foam structures in different loading conditions, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 35, No. 7, pp. 644-658, 2008.

[18] M. Zia Shamami, M. H. Pol, H. Khodarahmi, Experimental investigation of ballistic properties of aluminum foam structure, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 3, pp. 22-27, 2013. (in Persian فارسی)

[19] M. Choubini, Gh. H. Liaghat, M. H. Pol, Investigation of energy absorption and deformation of thin walled tubes with circle and square section geometries under transverse impact loading, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 75-83, 2015. (in Persian فارسی)

[20] M. Malekjafarian, S. K. Sadrnezhaad, Closed-cell Al alloy composite foams: Production and characterization, *Materials & Design*, Vol. 42, pp. 8-12, 2012.

[21] American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for High Speed Puncture Properties of Plastics Using Load and Displacement Sensors, ASTM D 3763, 2002.

[22] K. Hoffmann, *An Introduction to Stress Analysis and Transducer Design using Strain Gauges*, The definitive work on strain gauge measurement, pp. 126-209, HBM, 2011.

[23] X. Li, Y. Yang, D. Weiss, Ultrasonic cavitation based dispersion of nanoparticles in aluminum melts for solidification processing of bulk aluminum matrix Nano-composite: Theoretical study, Fabrication and characterization, *American Foundry Society Transactions*, Vol. 133, No. 2, pp. 1-12, 2007.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.7.11.6]