



بررسی تأثیر عملیات حرارتی بر پاسخ ضربه فوم آلومینیوم با رویکرد تحلیل آماری

حسین فراهات¹، سیدیوسف 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: 24 مرداد 1395

پذیرش: 30 مرداد 1395

ارائه در سایت: 18 مهر 1395

کلید واژگان:

فوم کامپوزیتی A356/SiC_p

رفتار ضربه

عملیات حرارتی

جذب انرژی

تحلیل آماری

چکیده

در مقاله حاضر، اثر عملیات حرارتی بر رفتار ضربه فوم آلومینیوم A356 تقویت شده توسط ذرات SiC، مورد مطالعه قرار گرفته و نتایج جدیدی تولید شد. ماده فومی با استفاده از روش ذوبی به کمک عامل فوم ساز CaCO_3 ساخته شد. بر تعدادی از نمونه های فوم، عملیات حرارتی T6 انجام شد. آزمایش ضربه سقوطی با استفاده از یک ضارب نیم کروی و با سرعت 6.70 m/s، بر پنج نمونه فوم عملیات حرارتی شده و پنج نمونه فوم بدون عملیات حرارتی انجام شد و نمودار تغییرات نیرو بر حسب زمان به دست آمد. پاسخ ضربه به دست آمده برای فوم کامپوزیتی A356/SiC_p، شامل سه ناحیه الاستیک، بار پلاتو و شکست است؛ فوم در ناحیه پلاتو می تواند تغییر شکل های پلاستیک را در یک بار تقریباً ثابت تحمل کند. مقادیر کم انحراف استاندارد و ضریب پراکندگی (برای پارامترهای مختلف) در تحلیل آماری داده ها، دلالت بر قابل اعتماد بودن نتایج به دست آمده از آزمایش و تکیه بر این نتایج جهت تحلیل کمی آن ها دارد. نتایج نشان داد که عملیات حرارتی انجام شده، سبب افزایش مقدار بار پلاتو به میزان 48.1% و نیز افزایش ظرفیت جذب انرژی فوم به میزان 40.3% می شود، همچنین طول ناحیه پلاتو در اثر عملیات حرارتی کاهش می یابد. انجام عملیات حرارتی با توجه به بهبود قابل توجه خواص مکانیکی فوم و افزایش مقاومت به ضربه آن می تواند به عنوان یک ایده مناسب در کاربردهای صنعتی فوم آلومینیوم مفید و مؤثر واقع شود.

Effect of heat treatment on the impact response of aluminum foam with consideration of statistical analysis

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 14 August 2016
Accepted 20 August 2016
Available Online 09 October 2016

Keywords:

A356/SiC_p composite foam
Impact behavior
Heat treatment
Energy absorption
Statistical analysis

ABSTRACT

In this paper, the effect of heat treatment on the impact behavior of A356 aluminum alloy foams reinforced by SiC particles was studied and new results were generated. The foam was manufactured by direct foaming of melts with blowing agent CaCO_3 . A number of foam specimens were processed by T6 aging treatment. The drop-weight impact test with a hemispherical striker tip and velocity of 6.70 m/s was carried out on five untreated foam specimens and five heat-treated foam specimens, and the load versus time history data was obtained. The obtained impact response of A356/SiC_p composite foam includes three stages: an elastic region, a plateau of load region and complete failure region. In plateau region, the plastic deformations can be tolerated by the foam at nearly constant load. The small amounts of standard deviation and coefficient of variation (for different parameters) obtained from statistical analysis of experimental data indicates the reliance on the results for quantitative analysis of them. The measurements showed that heat treating of Al foam results in an increase of the plateau load level and energy absorption capacity of the foam with 48.1% and 40.3% increase respectively. The length of plateau region is also decreased due to heat treatment. Regarding the significant improvement of mechanical properties of the foam and increase of its impact strength, the heat treatment after foam casting can be considered as a suitable approach for various industrial applications of aluminum foam.

1- مقدمه

نمایند و به طور گسترده به عنوان جاذب انرژی انتخاب، طراحی و مورد استفاده قرار می گیرند. با توجه به کاربرد وسیع فوم آلومینیوم در صنایع مختلف از جمله صنایع خودرو، هوافضا و کشتی سازی، اطلاع از رفتار مکانیکی این مواد به خصوص تحت بار دینامیکی ضروری است. شکل 1 نمونه ای از کاربردهای عملی فوم آلومینیوم را نشان می دهد که از آن به عنوان ماده هسته برای حفاظ اطراف پل و یا ضربه گیر وسایل نقلیه استفاده می شود [1-3].

اهمیت استفاده از سازه های سبک و در عین حال با استحکام بالا سبب شده تا فوم های فلزی¹ و به ویژه فوم های آلومینیوم مورد توجه خاص بسیاری از محققان قرار گیرد. این مواد سلولی با تغییر شکل پلاستیک بزرگ تحت بارگذاری استاتیکی و یا دینامیکی می توانند انرژی قابل ملاحظه ای را جذب

¹ Metal Foams

روش بررسی کرده‌اند [11-8,3]. آن‌ها برای انجام آزمون ضربه از ماشین اینسترون دایناتاپ¹⁷ استفاده کرده‌اند. نتایج آن‌ها بیانگر مقاومت فوم در برابر بار ضربه‌ای و نیز انرژی جذب‌شده توسط فوم در طی زمان ضربه است. موهان و همکاران [8]، رفتار ضربه ساختارهای ساندویچی با هسته فوم آلومینیوم¹⁸ و پوشش یک ورقه¹⁹ را بررسی کردند. آن‌ها برای ماده ورقه (پوسته)، سه جنس مختلف را انتخاب کردند: کامپوزیت پلیمری تقویت‌شده با فیبر کربن²⁰، آلایژ آلومینیوم و فولاد. نتایج آن‌ها نشان داد که جنس ورقه بر جذب انرژی و حالت شکست ماده تأثیر می‌گذارد. نمونه با ورقه فولادی تقریباً تمام انرژی ضربه را جذب می‌کند و در مقایسه با نمونه‌های دیگر بهترین انتخاب برای جذب انرژی است. مقاومت ماده فومی در برابر ضربه، ناشی از خمش و فروپاشی دیواره‌های سلول فوم، لهدیگی سلول‌ها در زیر نوک چکش ضارب و نیز پارگی سلول‌های پیرامون ضربه زنده است. چو و همکاران [9] به مطالعه و بررسی رفتار آسیب، تاریخچه بار ضربه‌ای و انرژی تلف‌شده هنگام نفوذ²¹ در فوم آلومینیوم تحت ضربه سقوطی کم‌سرعت پرداختند (ماده فومی با اتلاف انرژی جنبشی ضربه‌زن به‌عنوان جاذب انرژی عمل می‌کند). نتایج آن‌ها نشان داد که در شرایط انرژی ضربه یکسان مقدار انرژی جنبشی تلف‌شده توسط فوم به ازاء جرم ضربه‌زن²² بزرگ‌تر و سرعت ضربه کوچک‌تر، بیشتر است. آن‌ها پیشنهاد دادند که انجام آزمون ضربه با جرم کمتر و سرعت بیشتر جهت برآورد حداقل میزان جذب انرژی فوم به دلیل اجتناب از حالت تغییر شکل خمشی²³ مناسب‌تر است. کاسترو و همکاران [10]، رفتار ضربه سرعت پایین فوم آلومینیوم را مطالعه کردند. آن‌ها تأثیر پارامترهای جنس ماده زمینه فوم (آلایژ آلومینیوم 1100 و 6061)، اندازه سلول²⁴ (4.45 mm و 3.05 mm) و نیز اثر افزودن ورقه فلزی²⁵ به فوم را بررسی کردند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که فوم آلومینیوم 1100 نسبت به فوم آلومینیوم 6061 در برابر ضربه مقاوم‌تر است، همچنین اندازه سلول فوم بر میزان جذب انرژی ماده تأثیر چندانی ندارد. استفاده از پوشش ورقه فلزی نیز به طور قابل ملاحظه‌ای ظرفیت جذب انرژی فوم را افزایش می‌دهد. هان و همکاران [11] مشخصات ضربه²⁶ پل‌های ساندویچی با هسته فوم آلومینیوم را تحت انرژی‌های ضربه مختلف (50 J، 70 J و 100 J) به صورت آزمایشگاهی مطالعه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که بار حداکثر²⁷ در تمام آزمایش‌ها موقعی اتفاق می‌افتد که ضربه‌زنده به ورقه بالایی²⁸ نفوذ می‌کند. با افزایش انرژی ضربه زمانی که در آن بار حداکثر اتفاق می‌افتد کوتاه‌تر می‌شود. هوسانگ و ژائونگ [3] رفتار نفوذ و آسیب فوم آلومینیوم را در انرژی‌های مختلف ضربه بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که انرژی جذب‌شده با عمق نفوذ چکش ضارب به درون فوم متناسب است و میزان جذب انرژی فوم با افزایش انرژی ضربه اعمال‌شده بیشتر می‌شود.

کارایی فوم آلومینیوم می‌تواند با دو ایده مختلف بهبود یابد: 1- تغییر در مورفولوژی فوم²⁹ (شکل و اندازه سلول‌ها)، 2- تغییر در حالت متالورژیکی فلز زمینه³⁰ به کمک عملیات حرارتی [12]. مطالعات بسیار محدودی در مورد اثر

برای بررسی رفتار دینامیکی فوم آلومینیوم روش‌های آزمایش میله فشاری اسپلیت-هاپکینسون¹ و آزمایش ضربه سقوطی² استفاده می‌شود. در مطالعات پیشین با استفاده از آزمون اسپلیت-هاپکینسون، فوم‌های آلومینیومی تحت فشار دینامیکی با نرخ کرنش بالا آزمایش شده و اساساً حساسیت پارامترهای مختلف (مانند تنش پلاتو³ و مدول⁴) به نرخ کرنش⁵ بررسی شده است [7-4] تا از قابلیت جذب انرژی بالای آن‌ها برای کاربردهای عملی استفاده شود. موکائی و همکاران [7,4]، به مطالعه آزمایشگاهی پاسخ فشاری و نیز جذب انرژی فوم آلومینیوم سلول بسته آلپوراس⁶ تحت بارگذاری در نرخ کرنش⁷ 2500s^{-1} پرداختند و مشاهده کردند که کرنش سختی⁷ در طی فشار دینامیکی اتفاق می‌افتد. آن‌ها نتایج به‌دست‌آمده را با خواص مکانیکی فوم در نرخ کرنش شبه‌استاتیکی⁸ (0.001s^{-1}) مقایسه کرده و وابستگی قابل ملاحظه تنش تسلیم ماده به نرخ کرنش اعمالی را نشان دادند. ایشان گزارش کردند که جذب انرژی فوم در نرخ کرنش⁹ 2500s^{-1} به میزان 50% بیشتر از نرخ کرنش¹⁰ 0.001s^{-1} است. دشیپند و فلک [5] با انجام آزمون ضربه اسپلیت-هاپکینسون، رفتار فشاری دو نوع فوم آلومینیوم (آلویات⁹ و دوسل¹⁰) را در نرخ کرنش‌های مختلف بررسی کردند و دریافتند که تنش پلاتو و کرنش فشردگی¹¹ تقریباً به نرخ کرنش حساس نیست¹²؛ اما به چگالی فوم وابسته است. دلیل اختلاف نتایج موکائی و همکاران با نتایج دشیپند و فلک با توجه به گزارش دنمن و لنکفورد [6] مربوط به تفاوت‌های ماده و فرآیند تولید آن (ریختگی¹³ و متالورژی پودر¹⁴) است، همچنین اثرات نرخ کرنش به جریان سیال (هوا) از طریق دیواره‌های سلول گسیخته‌شده ارتباط دارد و می‌تواند توسط عواملی مانند شکل سلول، اندازه و توزیع سلول‌ها، نسبت ابعاد دیواره سلول¹⁵ و یکنواختی پروفیل مقطع دیواره سلول¹⁶ کنترل شود.

آزمون ضربه سقوطی یک روش کلاسیک برای بررسی رفتار دینامیکی مواد در نرخ کرنش‌های به نسبت پایین ($1000\text{s}^{-1} < \dot{\epsilon}$) است. برخی از محققان رفتار فوم آلومینیوم تحت ضربه سرعت پایین را با استفاده از این



Fig. 1 Example of practical applications of aluminum foam [3]

شکل 1 مثال از کاربردهای عملی فوم آلومینیوم [3]

- ¹ Split-Hopkinson Pressure Bar
- ² Drop Weight Impact Experiment
- ³ Plateau Stress
- ⁴ Modulus
- ⁵ Strain Rate Sensitivity
- ⁶ Alporas
- ⁷ Strain Hardening
- ⁸ Quasi-static Strain Rate
- ⁹ Alulight
- ¹⁰ Duocel
- ¹¹ Densification Strain
- ¹² Insensitive
- ¹³ Casting
- ¹⁴ Powder Metallurgical
- ¹⁵ Cell Wall Aspect Ratio
- ¹⁶ Uniformity of Wall Section Profile

¹⁷ Instron Dynatup

¹⁸ Aluminum Foam Core Sandwich Structures

¹⁹ Face Sheet

²⁰ Carbon Fiber Reinforced Polymer Composite

²¹ Dissipated Energy for Penetration

²² The Total Mass of the Impactor

²³ Bending Deformation Mode

²⁴ Cell Size

²⁵ Adding the Face Sheet

²⁶ Impact Characteristics

²⁷ Maximum Load

²⁸ Upper Face Sheet

²⁹ Foam Morphology

³⁰ Matrix Metal

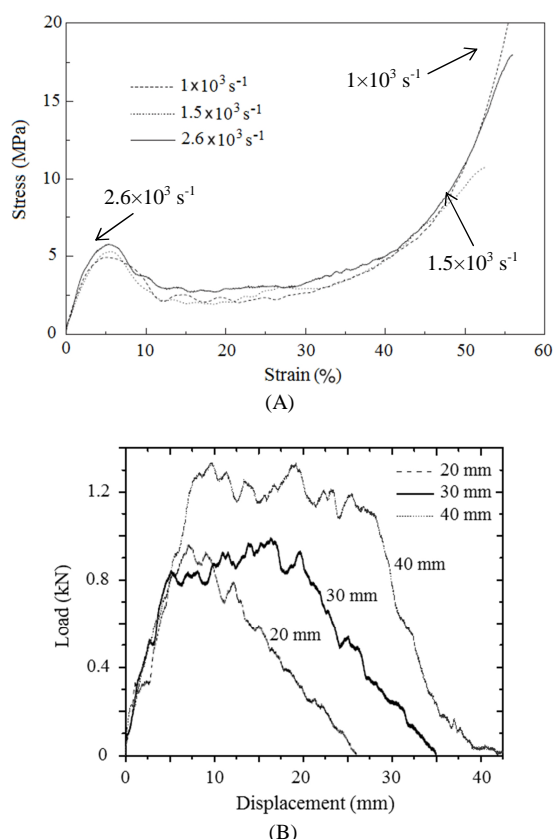


Fig. 2 Comparison of impact response of aluminum foam: (A) crushing behavior of the foam with different strain rates [13], (B) penetration behavior of the foam with different thicknesses [8]

شکل 2 مقایسه پاسخ ضربه فوم آلومینیوم: الف- رفتار لهیدگی فوم با نرخ کرنش های مختلف [13]، ب- رفتار نفوذ فوم با ضخامت های مختلف [8]

2- روش آزمایشگاهی

2-1- آماده سازی نمونه ها

در پژوهش حاضر برای تولید فوم آلومینیوم از روش ذوبی به کمک عامل فوم ساز⁹ استفاده شد که در آن اندازه سلول ها و توزیع چگالی موضعی فوم در مقایسه با سایر روش های تولید همگن تر¹⁰ است. از آلیاژ آلومینیوم ریختگی A356 با ترکیب شیمیایی جدول 1 به عنوان فلز پایه¹¹ استفاده شد. ذرات کاربید سیلیسیم SiC (به مقدار 5% وزنی) به منظور تقویت ماده زمینه فوم به درون مذاب آلومینیوم در دمای 680°C اضافه و هم زده شد. در مرحله بعد 3 درصد وزنی پودر کربنات کلسیم CaCO₃ به عنوان عامل فوم ساز به مذاب کامپوزیتی Al/SiC_p افزوده شد. بلافاصله، عمل فوم شدن آغاز و با خروج همزن از داخل قالب تکمیل شد. شکل 3 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ذرات SiC و CaCO₃ را نشان می دهد.

شکل 4 تصویر SEM از نمونه فوم تولید شده با چگالی نسبی 0.185 را

جدول 1 ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم A356

Table 1 The chemical composition of A356 aluminum alloy

عنصر	Si	Mg	Fe	Cu	Ti	Zn	Mn	Al
درصد وزنی	6.81	0.35	0.19	0.09	0.07	0.02	0.01	Rem.

⁹ Direct Foaming Route of Melt using foaming agent

¹⁰ Homogeneous

¹¹ Matrix Metal

عملیات حرارتی فوم آلومینیوم به خصوص برای آزمایش دینامیکی انجام گرفته است. این مطالعات فقط در خارج از کشور انجام شده است. محققان [15-13] آزمون اسپلیت-هاپکینسون را بر انواع مختلف فوم آلومینیوم با ساختار سلول باز¹ انجام دادند تا تأثیر عملیات حرارتی را بر رفتار لهیدگی² و مشخصات جذب انرژی آن ها بررسی کنند. فنگ و همکاران [13] اثر عملیات پیرسختی³ را بر خواص فشاری شبه استاتیکی و دینامیکی فوم آلومینیوم بررسی کردند. نتایج آن ها نشان داد که در اثر عملیات حرارتی مذکور تنش تسلیم و ظرفیت جذب انرژی فوم در نرخ کرنش های مختلف بهبود می یابد، اما کرنش فشردگی فوم وابستگی چندانی به عملیات حرارتی انجام شده ندارد. کائو و همکاران [14] تأثیر دو نوع عملیات حرارتی را بر خواص فشاری فوم آلومینیوم در نرخ کرنش بالا بررسی کردند: 1- عملیات پیرسختی، 2- عملیات T6 (انحلال⁴ + پیرسختی). نتایج آن ها نشان داد که هر دو عملیات حرارتی سبب افزایش استحکام فشاری دینامیکی و نیز افزایش انرژی جذب شده توسط فوم می شود. شبیه همین نتایج توسط وانگ و همکاران [15] نیز گزارش شده است. آن ها دو عملیات پیرسختی و T6 را بر نمونه های فوم آلومینیوم (از نوع دیگر) اجرا کردند و با استفاده از میله فشاری اسپلیت-هاپکینسون آزمایش دینامیکی در نرخ کرنش بالا⁵ (2000 s⁻¹) را روی نمونه های عملیات حرارتی شده⁶ و عملیات حرارتی نشده⁷ انجام دادند. داده های آزمایشگاهی به دست آمده حاکی از تغییر قابل ملاحظه خواص فوم (استحکام دینامیکی و جذب انرژی ماده) در اثر عملیات حرارتی است.

مقاله حاضر تأثیر عملیات حرارتی بر پاسخ ضربه سرعت پایین فوم آلومینیوم را گزارش می کند. ماده خاص (جدید) مورد مطالعه فوم کامپوزیتی آلومینیوم A356 تقویت شده توسط ذرات کاربید سیلیسیم SiC (A356/SiC_p) است. روش تولید ماده روش ذوبی است که در آن از پودر کربنات کلسیم CaCO₃ به عنوان عامل فوم ساز استفاده شده است. عملیات حرارتی استاندارد T6 بر تعدادی از نمونه های فوم انجام گرفته است. رفتار نفوذ⁸ نمونه های فوم عملیات حرارتی شده و نمونه های فوم بدون عملیات حرارتی با انجام آزمایش بررسی و تغییرات نیروی ضربه بر حسب زمان و نیز ظرفیت جذب انرژی آن ها با یکدیگر مقایسه شده است. بر خلاف کارهای محققان پیشین، در مقاله حاضر نتایج آزمایش ضربه برای همه نمونه های فوم گزارش شده و به تحلیل آماری داده های آزمایش پرداخته شده است. تاکنون نتایج گزارش شده ای در مورد بررسی تأثیر عملیات حرارتی بر رفتار نفوذ فوم آلومینیوم منتشر نشده است. محققین پیشین تأثیر عملیات حرارتی را بر رفتار لهیدگی فوم آلومینیوم مطالعه کرده اند. رفتار نفوذ و لهیدگی فوم تحت بارگذاری ضربه ای در شکل 2 مقایسه شده است. شکل الف، نمودار تنش-کرنش فوم تحت فشار دینامیکی را نشان می دهد. ملاحظه می شود که از کرنش بیش از 40% به دلیل فشردگی سلول های فوم مقدار تنش به شدت افزایش می یابد. در شکل ب نمودار نیرو-تغییر مکان (نیرو بر حسب عمق نفوذ چکش ضارب) برای فوم تحت ضربه سقوطی نشان داده شده است. پس از مرحله تغییر شکل پلاستیک فوم (که توسط ضربه زن ایجاد می شود) با پیشروی بیشتر ضارب به درون فوم، مقاومت ماده در برابر نفوذ کاهش یافته و نیرو به سرعت کاهش می یابد تا به صفر برسد.

¹ Open Cell

² Crushing Behavior

³ Aging Treatment (Age Hardening)

⁴ Solution

⁵ Dynamic Test at High Strain Rates

⁶ Heat-treated

⁷ Untreated

⁸ Penetration Behavior

نمونه‌های فوم، عملیات انحلال⁹ در دمای 540°C به مدت 12 ساعت انجام شد و سپس نمونه‌ها در آب کونج¹⁰ شدند. در مرحله بعد نمونه‌ها تحت عملیات پیرسازی¹¹ در دمای 155°C به مدت 5 ساعت قرار گرفتند.

3-2- آزمایش ضربه

بر اساس استاندارد ASTM D 3763 [21]، آزمون ضربه سقوطی کم‌سرعت بر نمونه‌های فوم آلومینیوم A356/SiC_p انجام شد. جزئیات مربوط به طراحی، ساخت، کالیبراسیون و صحت‌سنجی ماشین آزمایش ضربه و نحوه تجهیزسازی آن به حسگرهای الکترونیکی در مرجع [16] توسط نویسندگان توضیح داده شده است. آزمایش ضربه برای پنج نمونه فوم با عملیات حرارتی و پنج نمونه فوم بدون عملیات حرارتی تکرار شده است. نمونه بین صفحات گیره¹² بسته می‌شود. چکش ضارب (با انتهای نیم‌کروی به قطر 13 mm) و متعلقات آن¹³ مجموعاً به جرم 4.7 kg از یک ارتفاع مشخص و در امتداد دو ریل راهنما رها شده و به نمونه اصابت می‌کند. مقدار سرعت ضربه برابر 6.70 m/s است که از روی صفحه سرعت‌سنج قرائت می‌شود. شکل 6 تصویر دستگاه آزمایش و سیستم اکتساب داده‌ها¹⁴ را نشان می‌دهد. شکل 7 نشان‌دهنده نمونه فوم پس از انجام آزمایش است.

مدار لودسل¹⁵ دینامیکی شامل کرنش‌سنج HBM با مقاومت 350 اهم (که بر چکش چسبانده شده)، آمپلی‌فایر و اسیلوسکوپ (تک‌ترونیکس¹⁶ TDS1012B) است که توسط آن تغییرات نیرو برحسب زمان گزارش

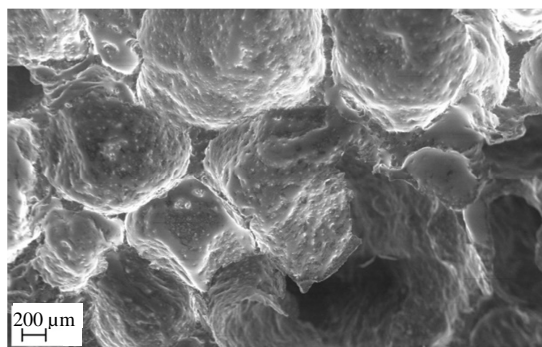


Fig. 4 SEM micrograph of A356/SiC_p composite foam

شکل 4 تصویر SEM از فوم کامپوزیتی A356/SiC_p

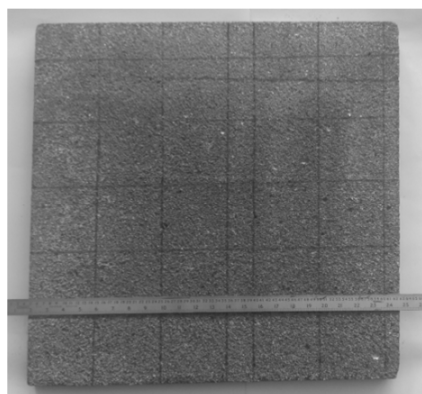
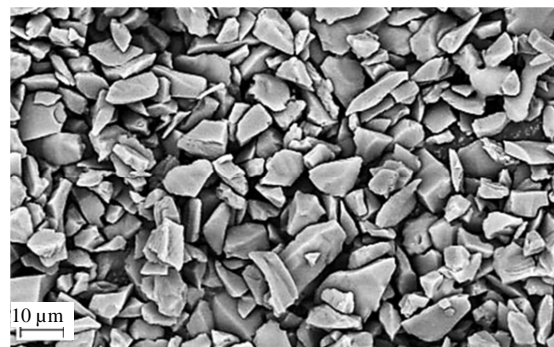


Fig. 5 A picture of foam product with dimensions of 57 cm×57 cm

شکل 5 تصویری از محصول فومی به ابعاد 57 cm×57 cm

(a) الف



(b) ب



Fig. 3 SEM micrograph of (a) SiC particles and (b) CaCO₃ powder

شکل 3 تصاویر SEM از الف- ذرات SiC، ب- پودر CaCO₃

نشان می‌دهد (منظور از چگالی نسبی¹، نسبت چگالی فوم به چگالی فلز پایه آلومینیوم است). جزئیات بیشتر در مورد مواد استفاده‌شده، روش تولید فوم کامپوزیتی A356/SiC_p و شرایط ریخته‌گری گردابی² در مرجع [16] توسط نویسندگان توضیح داده شده است.

در شکل 5 تصویری از فوم ساخته‌شده نشان داده شده است. محصول فوم متخلخل به‌دست‌آمده، یک فوم نسبتاً همگن، دارای ساختار سلول بسته³ و با قابلیت چکش‌خواری⁴ بوده که انتخاب مناسبی به‌عنوان جاذب انرژی ضربه است. اندازه سلول‌ها (مقدار متوسط) برابر با 3 mm، دانسیته نهایی فوم برابر با 0.5 gr/cm³ و درصد تخلخل⁵ برابر با 81% است (درصد تخلخل فوم برابر است با $1 - \rho_f / \rho_{Al}$ که ρ_{Al} و ρ_f به ترتیب چگالی فوم و چگالی آلومینیوم یعنی ماده زمینه فوم است). محصول فومی به نمونه‌هایی به ابعاد 100 mm×100 mm×20 mm برش داده شد و جهت انجام عملیات حرارتی و آزمایش ضربه آماده شد.

2-2- عملیات حرارتی فوم

در مورد شرایط عملیات حرارتی فوم آلومینیوم می‌توان از مراجع استاندارد موجود برای آلیاژ آلومینیوم غیرمتخلخل⁶ با همان ترکیب شیمیایی استفاده کرد [18,17]. در کار حاضر از هندبوک ASM [20,19] استفاده شد و پارامترهای عملیات حرارتی T6⁷ برای آلیاژ آلومینیوم ریختگی A356⁸ استخراج شده و برای فوم آلومینیوم A356 به شرح ذیل اجرا شد: ابتدا بر

⁹ Solution Treatment

¹⁰ Water Quenching

¹¹ Aging

¹² Clamp Plates

¹³ Crosshead

¹⁴ Data Acquisition System

¹⁵ Load-cell

¹⁶ Tektronix

¹ Relative Density

² Stir Casting

³ Closed Cell

⁴ Ductile

⁵ Porosity

⁶ Bulk (Solid and Non-Porous) Aluminum Alloy

⁷ T6-strengthening

⁸ Heat Treating A356 Aluminum Sand Castings

4- نتایج و بحث

4-1- بررسی نتایج از دیدگاه آماری

بررسی داده‌های آزمایش از جنبه آماری⁴ بسیار حائز اهمیت است. اگر نتایج فقط براساس یک نمونه گزارش شود صرفاً می‌توان به توصیف کیفی نتایج پرداخت. برای نمونه فقط می‌توان بیان کرد که روند تغییرات کم یا زیاد می‌شود. اگر چه این نوع بررسی مهم و مورد نیاز است، اما قطعاً کافی نیست و لازم است که علاوه بر آن با عدد و رقم و درصد روی نتایج بحث شود. برای اطمینان از صحت مقادیر کمی گزارش شده باید آزمایش برای تعدادی نمونه تکرار شود. بررسی تکرارپذیری⁵ به خصوص برای ماده کامپوزیت و متخلخل مطالعه شده در تحقیق حاضر مهم و قابل توجه است. چرا که توزیع ناهمگن سلول‌ها⁶ در فوم کامپوزیتی A356/SiCp، تا اندازه‌ای سبب پراکندگی نتایج⁷ می‌شود. اگر چه روش تولید فوم به کار رفته در کار حاضر منتج به تولید محصولی به نسبت همگن در مقایسه با روش‌های دیگر می‌شود، اما نمی‌توان ماهیت متخلخل ماده و عدم امکان کنترل برخی از عوامل تولید را نادیده گرفت. طبق استاندارد ASTM D 3763 [21] تعداد پنج نمونه فوم آلومینیوم در هر کدام از شرایط (با و بدون عملیات حرارتی) جهت انجام آزمایش انتخاب شد. طراحی و ساخت ماشین ضربه سقوطی و نیز انجام آزمایش ضربه بر فوم مطابق همین استاندارد بوده است [16]. تمام نمونه‌های فوم از یک دسته تولیدی⁸ به منظور حصول کمترین پراکندگی در نتایج انتخاب شد.

در شکل‌های 8-10 به ترتیب نمودار تغییرات نیرو-زمان، نیرو-تغییر مکان و انرژی جذب شده-زمان برای پنج نمونه فوم کامپوزیتی A356/SiCp فاقد عملیات حرارتی (نمونه‌های ریختگی⁹) نشان داده شده است. پاسخ ضربه¹⁰ فوم آلومینیومی همان‌طور که در شکل‌های 8 و 9 ملاحظه می‌شود شامل سه ناحیه زیر است. 1- ناحیه الاستیک¹¹، 2- ناحیه بار پلاتو¹² و 3- ناحیه شکست کامل¹³. این نواحی در شکل‌های 8 و 9 با شماره مختص داخل پراتنر مشخص شده است.

در ابتدا نیرو به طور تقریباً خطی افزایش می‌یابد تا این که به یک مقدار بیشینه اولیه¹⁴ می‌رسد. این امر مقاومت سلول‌های فوم در برابر نفوذ را نشان می‌دهد. سپس ناحیه بار پلاتو مشاهده می‌شود. در حقیقت، ساختار سلولی ماده سبب می‌شود که فوم بتواند پیش از شکست، تغییر شکل‌های پلاستیک را در یک بار تقریباً ثابت (بار پلاتو¹⁵) تحمل کند و بنابراین بخش قابل توجهی از انرژی ضربه جذب شده مربوط به ناحیه پلاتو است.

در نهایت نیرو با زمان کاهش یافته و هنگام نفوذ کامل چکش به داخل نمونه فوم به صفر می‌رسد. مطابق شکل 10 رفتار جذب انرژی فوم نشان می‌دهد که به تدریج و با گذشت زمان مقدار انرژی ضربه جذب شده افزایش یافته تا این که به یک مقدار بیشینه برسد. این مقدار حداکثر به عنوان انرژی جذب شده کل توسط فوم تلقی می‌شود.

نتایج آماری مربوط به آزمایش ضربه بر پنج نمونه فوم بدون عملیات حرارتی (نمونه‌های ریختگی) در جدول 2 ارائه شده است. در این جدول مقدار متوسط، انحراف استاندارد و ضریب پراکندگی (درصد) برای پارامترهای

می‌شود. جزئیات طراحی و نصب مدار لودسل بر دستگاه آزمون ضربه سقوطی در مرجع [16] ارائه شده است. با انترگرال‌گیری عددی از داده‌های شتاب نمودار نیرو- تغییر مکان به دست می‌آید و انرژی جذب شده توسط فوم با توجه به سطح زیر نمودار محاسبه می‌شود.

3- تحلیل آماری

به منظور تحلیل آماری داده‌های تجربی و نحوه گزارش‌دهی آن، عیناً از استاندارد ASTM D 3763 [21] استفاده شده است. مقدار متوسط¹ \bar{x} ، انحراف استاندارد² S و ضریب پراکندگی³ CV برای پارامترهای مختلف به صورت روابط (1-3) محاسبه می‌شود.

$$\bar{x} = \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) / n \quad (1)$$

$$S = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2 \right) / (n-1)} \quad (2)$$

$$CV = 100 \times S / \bar{x} \quad (3)$$

در روابط بالا n تعداد نمونه‌ها و x_i پارامتر اندازه‌گیری شده برای یک نمونه است. ضریب پراکندگی CV برحسب درصد بیان می‌شود.

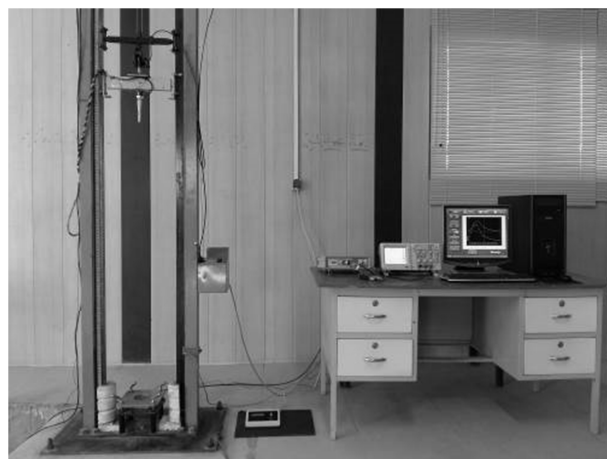


Fig. 6 A picture of the drop-weight impact testing machine and the data acquisition system (the experimental set up)

شکل 6 تصویری از دستگاه آزمون ضربه سقوطی و سیستم اکتساب داده‌ها (ست‌آپ آزمایشگاهی)

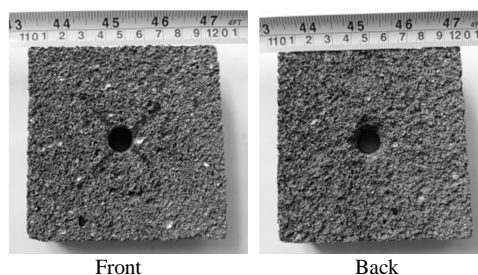


Fig. 7 Perfectly penetrated foam specimen

شکل 7 نمونه فوم کاملاً سوراخ‌شده

⁴ Statistics

⁵ Repeatability

⁶ Inhomogeneous Cell Distribution

⁷ Scattered Results

⁸ Batch

⁹ As Cast

¹⁰ Impact Response

¹¹ Elastic Region

¹² Plateau of Load Region

¹³ Complete Failure Region

¹⁴ Initial Peak Load

¹⁵ Plateau Load

¹ Average Value

² Standard Deviation

³ Coefficient of Variation

5- انرژی جذب شده کل توسط فوم. همچنین مقادیر این پارامترها برای هر کدام از نمونه‌های فوم نیز گزارش شده است. هر یک از پارامترهای بالا در جدول 2 با شماره مختص داخل پرانتز مشخص شده است.

شکل‌های 11-13 نتایج تجربی رفتار ضربه و جذب انرژی مربوط به فوم کامپوزیتی A356/SiC_p عملیات حرارتی شده را نشان می‌دهند. تحلیل آماری نتایج نیز در جدول 3 ارائه شده است که در آن هر پارامتر با شماره مختص خود مشخص شده است. نماد H در شکل‌های 11-13 و جدول 3 بیانگر نمونه عملیات حرارتی شده² است.

نتایج تحلیل آماری مربوط به نمونه‌های ریختگی (نمونه‌های فوم عملیات حرارتی نشده) در جدول 2 نشان می‌دهد که مقدار انحراف استاندارد (و ضریب پراکندگی) برای پارامترهای بار پلاتو، تغییر مکان در نقطه آغاز ناحیه پلاتو، تغییر مکان در نقطه پایان ناحیه پلاتو، زمان ضربه و انرژی جذب شده فوم به ترتیب برابر با 0.07 kN (4.45 %)، 0.97 mm (10.36 %)، 0.56 mm (4.22 %)، 0.07 ms (1.50 %) و 0.96 J (4.49 %) است. همچنین با توجه به جدول 3، این مقادیر برای فوم عملیات حرارتی شده به ترتیب برابر با 0.08 mm (6.51 %)، 0.78 mm (6.26 %)، 0.58 mm (5.02 %)، 1.51 J (4.79 %) و 0.08 ms (1.55 %) است. مقادیر کم انحراف استاندارد و ضریب پراکندگی برای پارامترهای مختلف بیان شده در بالا (با توجه به جداول 2 و 3)، دلالت بر قابل اعتماد بودن نتایج به دست آمده از آزمایش و تکیه بر

جدول 2 نتایج به دست آمده از تحلیل آماری داده‌های آزمایش ضربه برای پنج نمونه فوم کامپوزیتی A356/SiC_p عملیات حرارتی نشده (نمونه‌های ریختگی)

Table 2 The results obtained from statistical analysis of impact test data for five untreated (as cast) A356/SiC_p composite foam specimens

شماره پارامتر	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
نمونه 1	1.62 kN	8.81 mm	12.87 mm	4.45 ms	22.04 J
نمونه 2	1.70 kN	10.54 mm	12.67 mm	4.50 ms	20.83 J
نمونه 3	1.59 kN	8.31 mm	13.82 mm	4.46 ms	20.40 J
نمونه 4	1.71 kN	8.81 mm	13.87 mm	4.58 ms	22.66 J
نمونه 5	1.54 kN	10.16 mm	13.00 mm	4.40 ms	20.79 J
مقدار متوسط	1.63 kN	9.33 mm	13.25 mm	4.48 ms	21.34 J
انحراف استاندارد	0.07 kN	0.97 mm	0.56 mm	0.07 ms	0.96 J
ضریب پراکندگی	4.45 %	10.36 %	4.22 %	1.50 %	4.49 %

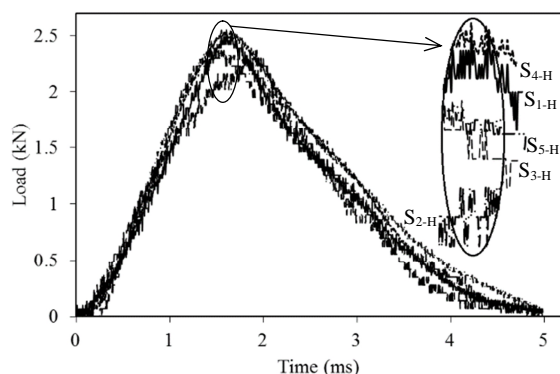


Fig. 11 The changes in impact load with time for five heat-treated A356/SiC_p composite foam specimens (S_{1-H}, S_{2-H}, S_{3-H}, S_{4-H}, S_{5-H})

شکل 11 تغییرات نیروی ضربه بر حسب زمان برای پنج نمونه فوم کامپوزیتی A356/SiC_p عملیات حرارتی شده (S_{1-H}, S_{2-H}, S_{3-H}, S_{4-H} و S_{5-H})

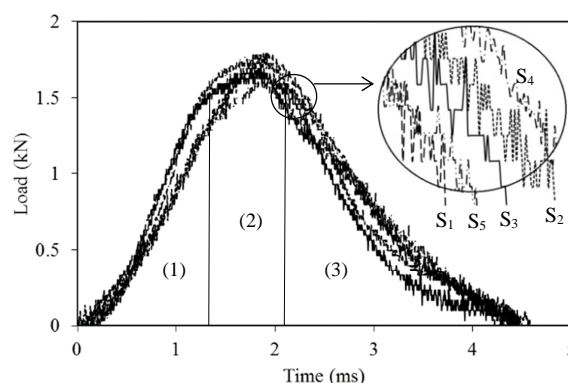


Fig. 8 The changes in impact load with time for five untreated A356/SiC_p composite foam specimens (S₁, S₂, S₃, S₄, S₅)

شکل 8 تغییرات نیروی ضربه بر حسب زمان برای پنج نمونه فوم کامپوزیتی A356/SiC_p عملیات حرارتی نشده (S₁, S₂, S₃, S₄ و S₅)

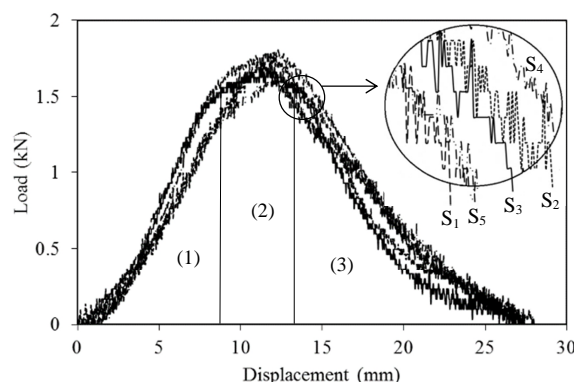


Fig. 9 The changes in impact load versus displacement for five untreated A356/SiC_p composite foam specimens (S₁, S₂, S₃, S₄, S₅)

شکل 9 تغییرات نیروی ضربه بر حسب تغییر مکان برای پنج نمونه فوم کامپوزیتی A356/SiC_p عملیات حرارتی نشده (S₁, S₂, S₃, S₄ و S₅)

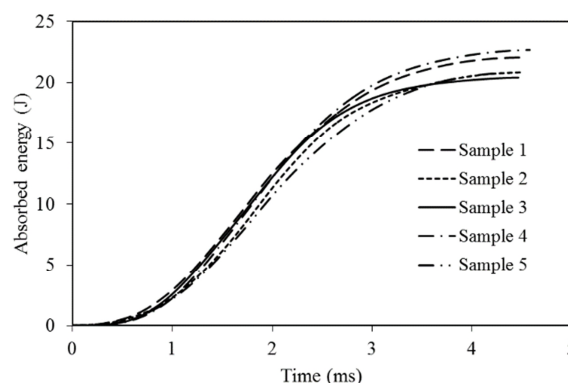


Fig. 10 The changes in absorbed energy versus time for five untreated A356/SiC_p composite foam specimens

شکل 10 تغییرات انرژی جذب شده بر حسب زمان برای پنج نمونه فوم کامپوزیتی A356/SiC_p عملیات حرارتی نشده

زیر گزارش شده است. 1- مقدار بار پلاتو که برابر با متوسط مقادیر نیرو در ناحیه پلاتو است، 2- مقدار تغییر مکان چکش در نقطه شروع ناحیه پلاتو، 3- مقدار تغییر مکان چکش در نقطه پایان ناحیه پلاتو، 4- زمان ضربه¹ و

² Heat-treated Sample

¹ Impact Time (Contact Duration)

جدول 3 نتایج به دست آمده از تحلیل آماری داده های آزمایش ضربه برای پنج نمونه فوم کامپوزیتی A356/SiC_p عملیات حرارتی شده

Table 3 The results obtained from statistical analysis of impact test data for five heat-treated A356/SiC_p composite foam specimens

شماره پارامتر	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
نمونه 1- H	2.40 kN	9.60 mm	11.89 mm	4.98 ms	30.92 J
نمونه 2- H	2.18 kN	9.83 mm	13.38 mm	4.90 ms	30.68 J
نمونه 3- H	2.26 kN	8.35 mm	11.34 mm	4.80 ms	29.85 J
نمونه 4- H	2.48 kN	9.54 mm	11.81 mm	4.93 ms	32.70 J
نمونه 5- H	2.33 kN	9.15 mm	11.73 mm	4.99 ms	33.49 J
مقدار متوسط	2.33 kN	9.29 mm	12.03 mm	4.92 ms	31.53 J
انحراف استاندارد	0.12 kN	0.58 mm	0.78 mm	0.08 ms	1.51 J
ضریب پراکندگی	5.02 %	6.26 %	6.51 %	1.55 %	4.79 %

عملیات حرارتی T6 بر پاسخ ضربه فوم با توجه به شکل های 14 و 15 کاملاً مشهود است. زمان ضربه از مقدار 4.45 ms به مقدار 4.98 ms افزایش می یابد. مقدار بار پلاتو (متوسط داده های نیرو در ناحیه پلاتو) برابر با 1.62 kN برای فوم عملیات حرارتی نشده و 2.40 kN برای فوم عملیات حرارتی شده است که 48.1% افزایش را نشان می دهد. در خصوص دلیل تأثیر عملیات حرارتی T6 بر بهبود خواص مکانیکی فوم و افزایش استحکام پلاتو² می توان به گزارش مراجع [15,12] استناد کرد. هدف از عملیات حرارتی تولید یک توزیع یکنواخت از رسوبات در ساختار ماده است. ساختارهای تعادلی (یا تعادل بیشتر³) منظم و سازگار با شبکه زمینه⁴، هنگام عملیات حرارتی و فرآیند رسوب گذاری شکل می گیرد و سبب تغییر قابل ملاحظه خواص ماده می شود. عملیات حرارتی T6 انجام شده بر فوم شامل سه مرحله انحلال، کوئچ و پیرسازی است: 1- یک محلول جامد از عناصر آلیاژی⁵ در طی عملیات انحلال تشکیل می شود؛ 2- انجام کوئچ اجازه می دهد تا این حالت در دمای محیط ثبات⁶ داشته باشد (پایدار بماند) و منجر به یک محلول جامد فوق اشباع⁷ می شود؛ 3- عملیات پیرسازی سبب تشکیل رسوبات ریز⁸ در نواحی فوق اشباع می شود.

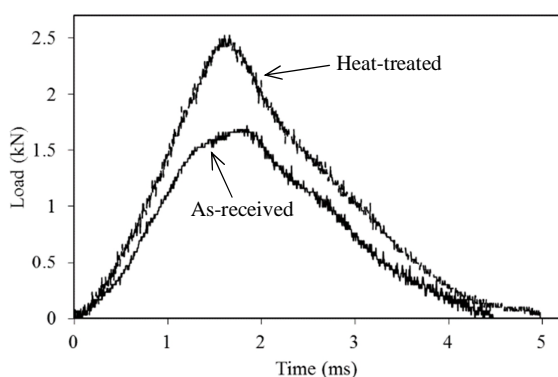


Fig. 14 The load as a function of time for as-received and heat-treated A356/SiC_p composite foams

شکل 14 نمودار نیرو بر حسب تابعی از زمان برای فوم کامپوزیتی A356/SiC_p عملیات حرارتی شده و عملیات حرارتی نشده (ریختگی)

² Plateau Strength

³ Larger Equilibrium Structures

⁴ Coherence with the Matrix Lattice

⁵ Solid Solution of the Alloying Elements

⁶ Stabilizing

⁷ Super-saturated Solid Solution

⁸ Fine Precipitates

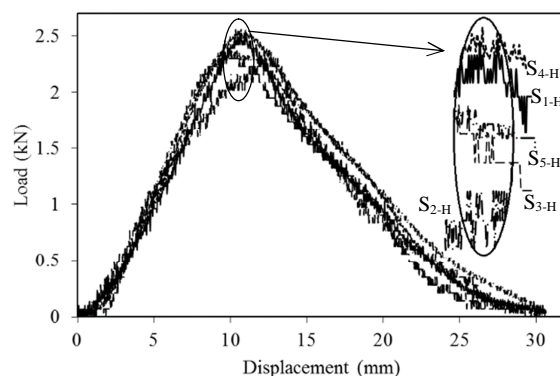


Fig. 12 The changes in impact load versus displacement for five heat-treated A356/SiC_p composite foam specimens (S_{1-H}, S_{2-H}, S_{3-H}, S_{4-H}, S_{5-H})

شکل 12 تغییرات نیروی ضربه بر حسب تغییر مکان برای پنج نمونه فوم کامپوزیتی A356/SiC_p عملیات حرارتی شده (S_{1-H}, S_{2-H}, S_{3-H}, S_{4-H} و S_{5-H})

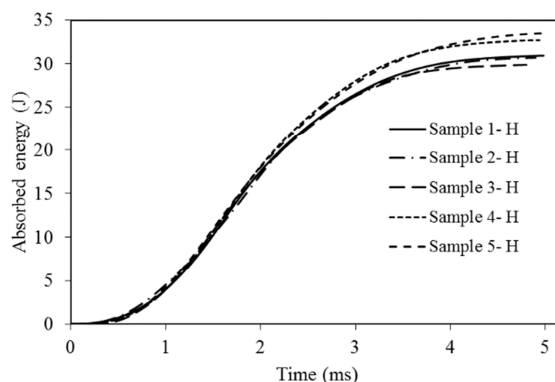


Fig. 13 The changes in absorbed energy versus time for five heat-treated A356/SiC_p composite foam specimens

شکل 13 تغییرات انرژی جذب شده بر حسب زمان برای پنج نمونه فوم کامپوزیتی A356/SiC_p عملیات حرارتی شده

این نتایج جهت تحلیل کمی آن ها دارد. پارامترهای گزارش شده در جداول 2 و 3 براساس استاندارد مرجع [21] است.

2-4- بررسی تأثیر عملیات حرارتی

پس از بحث و بررسی آماری نتایج بر پنج نمونه شاهد (در هر دو شرایط بدون عملیات حرارتی و با عملیات حرارتی¹) و اطمینان از اطلاعات کمی به دست آمده از آزمون ضربه اکنون می توان به مطالعه کیفی و کمی تأثیر عملیات حرارتی T6 بر پاسخ ضربه فوم A356/SiC_p که هدف اصلی مقاله حاضر است پرداخت.

در نمودار شکل 14 رفتار ضربه دو نمونه فوم، یکی فاقد عملیات حرارتی (نمونه ریختگی) و دیگری عملیات حرارتی شده مقایسه شده است. این دو نمونه با توجه به متوسط اطلاعات به دست آمده از آزمایش ها دارای اختلاف کمتری نسبت به سایر نمونه هاست و بنابراین انتخاب مناسبی برای تفسیر و تحلیل نتایج (از نظر کیفی و کمی) و استناد به مقادیر اندازه گیری شده توسط سنسور نیروسنج دینامیکی به شمار می آیند.

شکل های 14-16 به ترتیب نمودارهای نیرو-زمان، نیرو-تغییر مکان و انرژی جذب شده فوم بر حسب زمان را برای فوم کامپوزیتی با زمینه آلومینیوم در شرایط بدون عملیات حرارتی و با عملیات حرارتی نشان می دهند. تأثیر

¹ As-received and Heat-treated Situations

است. مرحله دوم (ناحیه پلاتو) که در آن چکش ضارب در فوم تغییر شکل ایجاد می‌کند، در زمان $t=2.01$ ms برای شرایط بدون عملیات حرارتی و در زمان $t=1.80$ ms برای شرایط با عملیات حرارتی پایان می‌یابد و برای شرایط یاد شده ناحیه بار پلاتو به ترتیب طی مدت 0.65 و 0.36 میلی‌ثانیه به طول می‌انجامد. در لحظه‌ای که مرحله سوم آغاز می‌شود ($t=1.80$ و $t=2.01$ ms) نرخ انرژی جذب شده⁶ شروع به کاهش یافتن می‌کند. یعنی آن که مقاومت سلول‌های فوم در برابر نفوذ روبه زوال می‌رود و در نتیجه مقدار نیرو کاهش یافته تا در نهایت به صفر برسد.

همان‌طور که در بالا بحث شد پاسخ ضربه فوم عملیات حرارتی شده حد الاستیک بالاتر و مقدار بار پلاتو بیشتری را در مقایسه با فوم فاقد عملیات حرارتی نشان می‌دهد. این امر سبب می‌شود که سطح زیر نمودار نیرو- تغییر مکان افزایش یابد و در نتیجه مطابق شکل 16 مقدار انرژی ضربه جذب شده از 22.04 ژول در شرایط بدون عملیات حرارتی به 30.92 ژول در شرایط با عملیات حرارتی تغییر می‌کند؛ بنابراین در اثر عملیات حرارتی انجام شده بر فوم ظرفیت جذب انرژی ماده به میزان 40.3 درصد افزایش می‌یابد.

با توجه به شکل 15 ملاحظه می‌شود که برای شرایط بدون عملیات حرارتی ناحیه بار پلاتو در تغییر مکان 8.81 mm شروع و در تغییر مکان 12.87 mm پایان می‌یابد و برای شرایط با عملیات حرارتی ناحیه بار پلاتو در تغییر مکان 9.60 mm شروع و در تغییر مکان 11.89 mm پایان می‌یابد. در نتیجه برای دو شرایط یاد شده به ترتیب یک ناحیه پلاتو با 4.06 و 2.29 mm تغییر مکان مشاهده می‌شود. این نشان می‌دهد که در اثر عملیات حرارتی انجام شده بر فوم طول ناحیه پلاتو⁷ کاهش می‌یابد. دقیقاً همین مشاهده آزمایشگاهی توسط کائو و همکاران [14] گزارش شده است. آن‌ها با استفاده از آزمون اسپلیت-هایپکینسون تأثیر دو نوع عملیات حرارتی مختلف، یکی عملیات T6 (شامل انحلال، کوچ در آب و پیرسختی) و دیگری فقط عملیات پیرسختی را بر خواص فشاری دینامیکی⁸ فوم آلومینیوم بررسی کردند. شکل 17 نمودار تنش- کرنش فوم تحت بارگذاری فشاری در نرخ کرنش بالا را نشان می‌دهد که توسط کائو و همکاران گزارش شده است.

آن‌ها نتیجه گرفتند که انجام هر دو عملیات حرارتی بر فوم سبب کاهش طول ناحیه پلاتو می‌شود. نمودار نیرو- زمان فوم آلومینیوم در کار حاضر (شکل 14) نیز این موضوع را به درستی نشان می‌دهد و صحت انجام آزمایش در کار حاضر را تأیید می‌کند. وجه تفاوت کار حاضر با کار کائو علاوه بر ماده

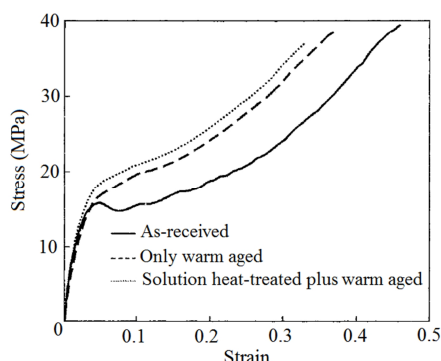


Fig. 17 Compressive stress-strain responses of untreated and heat-treated aluminum foam specimens under high strain rate [14]

شکل 17 پاسخ تنش- کرنش فشاری نمونه‌های فوم آلومینیوم عملیات حرارتی شده و عملیات حرارتی نشده تحت نرخ کرنش بالا [14]

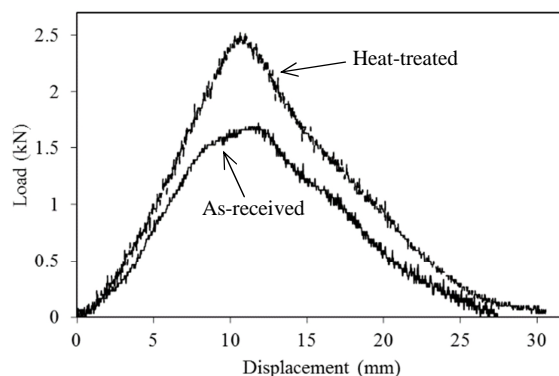


Fig. 15 The load-displacement plot for untreated and heat-treated conditions

شکل 15 نمودار نیرو- تغییر مکان برای شرایط با و بدون عملیات حرارتی

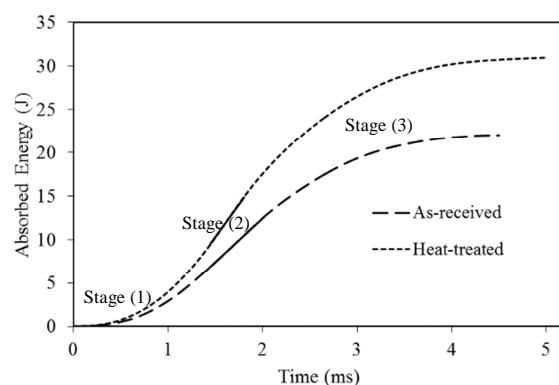


Fig. 16 The absorbed energy versus time for untreated and heat-treated foams, and also three stages of the impact response of the foam

شکل 16 انرژی جذب شده برحسب زمان برای فوم عملیات حرارتی شده و عملیات حرارتی نشده و نیز سه مرحله پاسخ ضربه فوم

این رسوبات (تولید شده در ساختار فوم) با ناهنجاری‌ها¹ فعل و انفعال انجام داده و در برابر حرکت ناهنجاری‌ها مقاومت می‌کنند و بنابراین منجر به کرنش سختی و افزایش استحکام ماده فومی می‌شوند؛ بنابراین در اثر این عملیات رسوب سختی²، مقاومت به ضربه فوم افزایش می‌یابد.

پیشتر یاد شد که پاسخ ضربه فوم دارای سه مرحله (سه ناحیه) است. در منحنی شکل 16 ملاحظه می‌شود که نرخ انرژی جذب شده توسط فوم در مرحله اول (ناحیه الاستیک) افزایش می‌یابد، در مرحله دوم (ناحیه پلاتو) ثابت است و در مرحله سوم (شکست فوم) آغاز به کاهش یافتن می‌کند. در این شکل سه مرحله یاد شده بر منحنی جذب انرژی فوم نشان داده شده و ناحیه بار پلاتو با خط توپر مشخص شده است.

اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی مطابق شکل 14 نشان می‌دهد که مرحله اول یعنی ناحیه الاستیک طی مدت 1.36 میلی‌ثانیه برای شرایط بدون عملیات حرارتی و 1.44 میلی‌ثانیه برای شرایط با عملیات حرارتی طول می‌کشد. بار پیک اولیه³ که در زمان‌های $t=1.36$ ms و $t=1.44$ ms اتفاق می‌افتد، به ترتیب برابر با 1.56 kN و 2.36 kN است که بیانگر افزایش حد الاستیک⁴ به میزان 51.3 درصد است. این به معنای آن است که مقاومت ماده فومی در برابر نفوذ ضربه‌زننده⁵ در اثر عملیات حرارتی افزایش یافته

¹ Dislocations

² Precipitation Hardening

³ Initial Peak Load

⁴ Elastic Limit

⁵ Striker Penetration

⁶ The Rate of Energy Absorbed by the foam

⁷ The Length of Plateau Region

⁸ Dynamic Compressive Properties

6- تقدیر و تشکر

نویسندگان تشکر و قدردانی ویژه خود را از آقای دکتر سید حجت هاشمی جهت در اختیار قراردادن تجهیزات آزمایشگاه ضربه و نیز همکاری بی دریغ ایشان در انجام آزمون‌های تجربی اعلام می‌دارند.

7- مراجع

- [1] M. F. Ashby, A. G. Evans, N. A. Fleck, L. J. Gibson, J. W. Hutchinson, H.N.G. Wadley, *Metal Foams: A Design Guide*, pp. 150-154, Woburn, Butterworth-Heinemann, 2000.
- [2] J. Banhart, Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams, *Progress in Materials Science*, Vol. 46, No. 6, pp. 559-632, 2001.
- [3] C. Hosun, C. Jaeung, Damage and penetration behavior of aluminum foam at various impacts, *Central South University*, Vol. 21, No. 9, pp. 3442-3448, 2014.
- [4] 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.
- [5] V. S. Deshpande, N. A. Fleck, High strain rate compressive behaviour of aluminum alloy foams, *Impact Engineering*, Vol. 24, No. 3, pp. 277-298, 2000.
- [6] K. A. Dannemann, J. Lankford Jr, High strain rate compression of closed-cell aluminum foams, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 293, No. 1-2, pp. 157-164, 2000.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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, *Automotive Technology*, Vol. 14, No. 1, pp. 61-66, 2013.
- [12] D. Lehmhus, J. Banhart, Properties of heat-treated aluminium foams, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 349, No. 1-2, pp. 98-110, 2003.
- [13] Y. Feng, N. Tao, Z. Zhu, S. Hu, Y. Pan, Effect of aging treatment on the quasi-static and dynamic compressive properties of aluminum alloy foams, *Materials Letters*, Vol. 57, No. 24-25, pp. 4058-4063, 2003.
- [14] X.-q. Cao, Z.-h. Wang, H.-w. Ma, L.-m. Zhao, G.-t. Yang, Effects of heat treatment on dynamic compressive properties and energy absorption characteristics of open-cell aluminum alloy foams, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 16, No. 1, pp. 159-163, 2006.
- [15] Z. Wang, Z. Li, J. Ning, L. Zhao, Effect of heat treatments on the crushing behaviour and energy absorbing performance of aluminium alloy foams, *Materials & Design*, Vol. 30, No. 4, pp. 977-982, 2009.
- [16] 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)
- [17] F. Campana, D. Pilone, Effect of heat treatments on the mechanical behaviour of aluminium alloy foams, *Scripta Materialia*, Vol. 60, No. 8, pp. 679-682, 2009.
- [18] Private communication with Dr. Dirk Lehmhus, the author of the paper: "Properties of heat-treated aluminum foams" (reference [12] of this paper), September 2, 2014.
- [19] ASM Handbook, Vol. 4, *Heat treating*, Heat Treating of Aluminum Alloys, 1991.
- [20] ASM Handbook, Vol. 2, *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, Properties of Cast Aluminum Alloys, 1990.
- [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.

خاص مطالعه شده (فوم کامپوزیتی تقویت شده) در این است که در کار حاضر رفتار نفوذ فوم مورد بررسی قرار گرفته، اما در کار کائو رفتار لهیدگی فوم بررسی شده است که توضیح و مقایسه این دو رفتار پیشتر بیان شد.

براساس نتایجی که توسط کائو و همکاران [14] و نیز وانگ و همکاران [15] گزارش شده برای دو عملیات حرارتی T6 و پیرسختی¹ میزان افزایش استحکام فشاری دینامیکی² و ظرفیت جذب انرژی فوم برای شرایط T6 بارزتر و بنابراین در کار حاضر از عملیات حرارتی T6 استفاده شده است.

5- نتیجه گیری

در مقاله حاضر رفتار نمونه‌های فوم سلول بسته کامپوزیتی A356/SiC_p (فوم آلومینیوم A356 تقویت شده توسط ذرات SiC) تحت ضربه سقوطی کم سرعت بررسی شد. عملیات حرارتی استاندارد T6 بر تعدادی از نمونه‌های فوم انجام شد. این عملیات شامل انحلال، کونچ و پیرسختی بوده و براساس هندبوک ASM اجرا شده است. آزمایش ضربه بر نمونه‌های عملیات حرارتی شده و نمونه‌های بدون عملیات حرارتی (نمونه‌های ریختگی) انجام شد. تأثیر عملیات حرارتی بر پاسخ ضربه و میزان جذب انرژی فوم پس از مطالعه داده‌های آزمایش به لحاظ آماری و بررسی تکرارپذیری نتایج بررسی شد.

تحلیل آماری داده‌ها و گزارش آن عیناً مطابق استاندارد ASTM انجام شده است. مقدار ضریب پراکندگی برای پارامترهای بار پلاتو، تغییر مکان در نقطه شروع ناحیه پلاتو، تغییر مکان در نقطه پایان ناحیه پلاتو، زمان ضربه و انرژی جذب شده فوم به ترتیب برابر با % 4.45، % 10.36، % 4.22، % 1.50 و % 4.49 برای شرایط بدون عملیات حرارتی و نیز برابر با % 5.02، % 6.26، % 6.51، % 1.55 و % 4.79 برای شرایط با عملیات حرارتی است. با توجه به پراکندگی کم نتایج آزمایش صحت اطلاعات کمی به دست آمده (برای ماده مورد مطالعه) مورد تأیید است.

پاسخ ضربه فوم آلومینیوم شامل مرحله است: یک رفتار خطی اولیه، یک محدوده بار پلاتو که در آن نیرو تقریباً ثابت است و در نهایت شکست فوم. در اثر عملیات حرارتی، طول ناحیه پلاتو کاهش می‌یابد. مقایسه با نتایج محققان دیگر نیز بر این امر صحت می‌گذارد.

اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی نشان داد که ماده فوم آلومینیوم به خوبی قابلیت تضعیف بار ضربه‌ای را دارد. این امر در شرایطی که بر فوم عملیات حرارتی انجام گیرد بسیار مشهودتر است. عملیات حرارتی T6 سبب افزایش استحکام پلاتو به میزان 48.1 درصد می‌شود، همچنین ظرفیت جذب انرژی فوم به میزان 40.3٪ در اثر عملیات حرارتی افزایش می‌یابد. این نتیجه به خصوص زمانی حائز اهمیت است که فوم کامپوزیتی A356/SiC_p به عنوان یک ماده جاذب انرژی انتخاب و طراحی شود.

با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش می‌توان استنباط کرد که انجام عملیات حرارتی بر فوم آلومینیوم در بهبود خواص مکانیکی آن بسیار مؤثر است؛ همچنین امکان کنترل بیشتر بر پاسخ دینامیکی فوم وجود دارد؛ بنابراین استفاده از عملیات حرارتی به عنوان یک ایده مفید و مناسب برای انجام مطالعات در زمینه ساخت قطعات فومی و با هدف کارائی بیشتر آن در صنعت پیشنهاد می‌شود.

¹ Age Hardening² Dynamic Compressive Strength