



## Experimental Evaluation of The Effect of Aluminum Alloy Foam Core on The Mechanical Behavior of Sandwich Panel

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Original Research

#### Authors

Aghanasiri A.<sup>1</sup>,  
Rezaei Ashtiani H.<sup>1\*</sup>

#### How to cite this article

Aghanasiri A, Rezaei Ashtiani H. Experimental Evaluation of The Effect of Aluminum Alloy Foam Core on The Mechanical Behavior of Sandwich Panel. Modares Mechanical Engineering, 2023; 23 (06):379-386.

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran

#### \*Correspondence

Address: Arak University of Technology, Daneshgah St., 38181-46763, Arak, Iran

hr\_rezaei@arakut.ac.ir

#### Article History

Received: January 17, 2023

Accepted: May 20, 2023

ePublished: June 16, 2023

### ABSTRACT

The type and material of the core piece of sandwich panels are important parameters in the mechanical behavior of these sandwich samples. In this study, the mechanical behavior of sandwich panels with two types of aluminum alloy foam core was investigated. Also, the effect of the method used to stabilize aluminum foam investigates and compares during the bending and compressive tests, for this purpose, the properties of the core of sandwich panels made with LM13 alloy aluminum foam were fabricated with calcium stabilizer and silicon carbide powder separately. The results of the X-ray diffraction test showed the presence of Al<sub>4</sub>Ca intermetallic compounds in aluminum foams containing calcium metal, and silicon carbide particles for aluminum foams containing silicon carbide powder in the cell wall. The yield strength of sandwich panels with aluminum foam core and calcium metal stabilizer was higher than that of cores with silicon carbide particle stabilizer. Also, sandwich panels with aluminum foam cores containing silicon carbide powder showed more energy absorption. In contrast, foams with silicon carbide powder stabilizer absorbed more energy under the uniaxial pressure test. Also, the results of the macrostructure analysis of how the shape of the sandwich panel changed in the three-point bending test were indicative of a reduction in force due to the weakness in the connection between the sandwich panel shell and the aluminum foam core.

**Keywords** Sandwich Panel, Aluminum Alloy Foam Core, Calcium, Silicon Carbide, Bending Strength.

### CITATION LINKS

1- Lightweight materials in transportation. 2- Morphology of aluminum alloy foams. 3- Light-metal foams. 4- Light-metal foams. 5- Grain refiners as liquid metal foam stabilisers. 6- Bending Stiffness of Aluminium Foams. 7- Effect of cell morphology on... 8- Fabrication of aluminum foams. 9- Composite and nanocomposite metal foams. 10- Structure and distribution of oxides in aluminium foam. 11- Stabilisation of aluminium foams. 12- A study of Mg and Cu additions on... 13- Metal foams: production and stability. 14- Foam stabilization by magnesium. 15- Foam stabilization by aluminum powder. 16- Manufacturing of Composite Metal Foam 17- Light-metal foams. 18- Metal foams. 19- Effect of silicon content on... 20- The effect of adding silicon and zinc elements on... 21- Assessment of TiH<sub>2</sub> and CaCO<sub>3</sub> Blowing Agents on... 22- The effect of core thickness on the flexural behaviour of... 23- Three-point bending of sandwich beams with... 24- Aluminum foam sandwich with density-graded open-cell core. 25- Flexural strength and energy absorption of... 26- Effect of in situ Al<sub>3</sub>Zr particles on... 27- High mechanical performance alumina-reinforced aluminum... 28- Correlation between foam structure and mechanical performance of... 29- Development of AlMg<sub>35</sub>-TiH<sub>2</sub> composite... 30- Nanostructural approach to the thickening behavior. 31- Comparative study on TiH<sub>2</sub> and CaCO<sub>3</sub> for... 32- Deformation and failure mechanisms of sandwich beams. 33- Investigation of glue strength effect on bending behavior 34- Response of aluminium foams strength-cored. 35- aluminum composite foams produced from powder compacts. 36- Solids: Struct. 37- Manufacturing of Al/SiCp composite foams using calcium carbonate. 38- Compressive behavior of SiCp/AlSi9Mg composite foams.

## ارزیابی تجربی اثر هسته فومی آلیاژ آلومینیوم بر رفتار مکانیکی ساندویچ پانل

عبدالله آقانسیری<sup>۱</sup>، حمیدرضا رضایی آشتیانی<sup>۱\*</sup>

<sup>۱</sup> گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

### چکیده

از موارد حائز اهمیت در رفتار مکانیکی ساندویچ پنل‌ها نوع و جنس قطعه هسته می‌باشد. در مطالعه حاضر رفتار مکانیکی ساندویچ پنل با دو نوع هسته فوم آلیاژ آلومینیوم مورد بررسی قرار گرفت. همچنین به منظور بررسی و مقایسه میزان تاثیر روش به کار رفته جهت تثبیت فوم‌های آلومینیومی در خواص خمشی و فشاری هسته ساندویچ پنل‌ها، فوم آلومینیوم آلیاژی LM13 با تثبیت کننده کلسیم و پودر کاربید سیلیسیم به صورت جداگانه تولید شد. نتایج آزمایش پراش پرتو اشعه ایکس نشان دهنده حضور ترکیبات بین‌فلزی Al<sub>4</sub>Ca در فوم‌های آلومینیومی حاوی فلز کلسیم، و ذرات کاربید سیلیسیم برای فوم‌های آلومینیومی حاوی پودر سیلیکون کاربید در دیواره سلولی بود. میزان استحکام تسلیم در ساندویچ پنل‌هایی با هسته فوم آلومینیوم و تثبیت کننده فلز کلسیم از هسته‌هایی با تثبیت کننده ذرات کاربید سیلیسیم بالاتر بود. همچنین ساندویچ‌هایی با هسته فوم آلومینیوم حاوی پودر کاربید سیلیسیم قابلیت جذب انرژی بیشتری از خود نشان دادند. در مقابل فوم‌هایی با تثبیت کننده پودر کاربید سیلیسیم انرژی بیشتری را تحت آزمایش فشار تک محوری جذب نمودند. همچنین نتایج بررسی میکروساختار از نحوه تغییر شکل ساندویچ پنل در آزمایش خمش سه نقطه گویای کاهش نیرو در اثر ضعف در اتصال بین پوسته ساندویچ پنل و هسته فوم آلومینیومی بود.

**کلیدواژه‌ها:** ساندویچ پنل، هسته فوم آلومینیوم، کلسیم، کاربید سیلیسیم، استحکام خمشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۳۰

\*نویسنده مسئول: hr\_rezaei@arakut.ac.ir

### ۱- مقدمه

از نظر تاریخی، ایده ایجاد مواد سلولی مصنوعی با مشاهده خواص منحصر به فردی همچون نسبت استحکام به وزن بالا مواد طبیعی مانند پوکه های معدنی، شاخ و برگ درختان و یا حتی ساختار سلولی موجود در استخوان بدن انسان و حیوانات شکل گرفت [1,2] و پژوهشگری به نام دی میلر برای اولین بار ایده ساخت سازه‌هایی با هسته سلولی را ارائه داد [3]. پس از جنگ جهانی دوم و نیاز روز افزون صنایع به سبک سازی سازه‌ها و کاهش آلایندگی‌های ناشی از سوخت‌های فسیلی، سرانجام تلاش پژوهشگران در قرن بیستم منجر به تولید فوم‌های فلزی از مواد پایه چگال شد [3,4]. تولید و جایگزین نمودن فلزات متخلخل با مواد طبیعی ضعیف مثل چوب برای سازه‌های ساندویچی منجر به ارتقاء چشمگیر خواص مکانیکی خواهد شد [5]. شکل پذیری، جذب انرژی مناسب در برابر ضربه، توانایی میرایی ارتعاشات، قابلیت بازیافت، این مواد را تبدیل به یکی از گزینه‌های اصلی برای ساخت سازه‌های جاذب

انرژی نموده است [2]. امروزه فوم‌های فلزی تولید شده بیشتر بر پایه آلومینیوم و نیکل اند، اما فوم‌های تیتانیوم، منیزیم، سرب، مس، روی، برنز و فولاد نیز تولید و در دسترس اند [6]. در این میان فوم آلومینیوم با توجه به نقطه ذوب پایین، قابلیت فوم شوندگی خوب و چگالی پایین بیشترین کاربرد را در بین فوم‌های فلزی دارد [5,6]. با توجه به وابستگی خواص مکانیکی این مواد با مورفولوژی سلولی، تلاش بسیاری از محققان در جهت شناسایی پارامترهای تاثیر گذار بر روی شکل و اندازه سلول و همچنین ضخامت دیواره سلولی انجام شده است [7,8]. به طور کلی تولید یک فوم فلزی ایده آل با توزیع یکنواخت منافذ در کل ساختار و همچنین سایز سلولی یکسان دشوار بوده و نیازمند صرف وقت، هزینه و انجام تحقیقاتی گسترده است [2]. در حال حاضر از میان انواع روش‌های ابداع شده جهت تولید فوم‌های فلزی، دو روش پرکاربرد برای تولید انبوه این فوم‌ها با لحاظ کردن صرفه اقتصادی روش تولید، عبارتند از: فوم سازی مستقیم که در آن از مذاب فلز پایه جهت تولید فوم استفاده می‌شود و روش دوم فوم سازی به کمک روش متالورژی پودر و با استفاده از ترکیب پودرهای مناسب می‌باشد [2]. از پارامترهای تاثیر گذار در تعیین مورفولوژی سلولی که از بزرگترین چالش‌های صنعت تولید فوم‌های فلزی نیز به حساب می‌آید نحوه تقویت و افزایش ویسکوزیته فلز پایه می‌باشد [9]. انجام این مرحله از فرایند فوم سازی به منظور بهبود خواص مکانیکی و همچنین جلوگیری از فرار حباب‌های ایجاد شده درون مذاب امری است که در غالب پژوهش‌ها به آن پرداخته شده است [10,14]. به طور کلی دو نوع روش برای افزایش ویسکوزیته مذاب ارائه گردیده است که عبارتند از: اضافه نمودن ذرات سرامیکی جامد به فلز مذاب و روش دوم تشکیل درجای اکسیدها و ذرات بین فلزی در فلز پایه [15]. در روش اول پس از تهیه مذاب از فلز مورد نظر، پودرهای سرامیکی به مذاب اضافه شده و به منظور توزیع مناسب ذرات سرامیکی و افزایش ویسکوزیته مخلوط مذاب و پودر سرامیک به مدت چند دقیقه هم زده می‌شود. ترکیب ذرات سرامیکی جامد با مذاب منجر به افزایش ویسکوزیته مذاب شده و آن را برای مرحله بعد که ایجاد حباب‌های گازی در مذاب است آماده می‌کند. افزایش ویسکوزیته مذاب با استفاده از این استراتژی معمولاً به حجم زیادی (بیش از ۱۰ درصد حجمی) ذرات سرامیکی نیاز دارد که این امر منجر به شکنندگی فوم‌های تولیدی به دلیل ایجاد تغییر شکل موضعی در دیواره‌های سلولی در نتیجه قرارگیری این ذرات خواهد شد. از طرفی ریزتر شدن ذرات سرامیکی، درصد حجمی مورد نیاز برای افزایش ویسکوزیته مذاب را افزایش خواهد داد [16]. چالش دیگر این روش عدم ترشوندگی مناسب ذرات سرامیکی توسط مذاب است [15]. از دیگر معایب آن می‌توان به دشواری برش و ماشینکاری محصولات فومی تولیدی با استفاده از این روش اشاره نمود که در نهایت منجر به افزایش هزینه محصول نهایی خواهد شد. عدم استحکام کافی این نوع از

تحقیقاتی میزان تاثیر درصد حجمی عنصر روی در خواص فشاری فوم آلومینیوم را بررسی نمودند.

بررسی ساختار و میزان جذب انرژی فوم پایه فلزی Al-7%Si-3%SiC تولید شده به روش متالورژی پودر، توسط دو عامل حباب‌زا کربنات کلسیم و تیتانیوم هیدراید توسط میرباقری و همکاران<sup>[21]</sup> بررسی شد. نتایج آن‌ها نشان داد که عامل حباب‌زا کربنات کلسیم در مقایسه با تیتانیوم هیدراید باعث افزایش دانسیته حفره‌ها و پایداری آن‌ها خواهد شد، ولی زمان فرایند طولانی تر از عامل تیتانیوم هیدراید می‌باشد. همچنین میزان جذب انرژی فوم‌هایی با عامل کربنات کلسیم بیشتر از تیتانیوم هیدراید گزارش شده است. استایلیس و همکاران<sup>[22]</sup> در مطالعه‌ای به منظور بررسی تاثیر ضخامت هسته فوم آلومینیوم در ساندویچ پنل‌هایی با رویه‌هایی از جنس الیاف شیشه، گزارش نمودند که افزایش ضخامت هسته از ۵ به ۲۰ میلیمتر و افزایش تعداد لایه‌های الیاف از ۱ به ۴، منجر به افزایش نیروی قابل تحمل خواهد شد. همچنین تقویت ساندویچ پنل هسته راه راه به وسیله فوم آلومینیومی و انجام آزمایش خمش توسط یان و همکاران<sup>[23]</sup> بررسی گردید. نتایج آزمایشات آن‌ها نشان داد که استفاده از فوم آلومینیوم به منظور تقویت هسته منجر به افزایش چشمگیر سختی خمشی، حداکثر نیروی لازم برای تخریب ساندویچ، افزایش ظرفیت جذب انرژی و تغییر نحوه شکست نسبت به ساندویچ پنل با هسته راه راه خواهد شد. بررسی استحکام فشاری و خمشی ساندویچ پنل با هسته فوم آلومینیوم سلول باز درجه بندی شده و مقایسه خواص آن با ساندویچ با هسته فوم آلومینیوم تک لایه نیز توسط شانموگاسامی و منصور<sup>[24]</sup> انجام شد. مشاهدات آن‌ها نشان داد که میزان جذب انرژی هسته فومی درجه بندی شده در مقایسه با ساندویچ با هسته معمولی افزایش چشمگیری به خصوص در تغییر شکل‌های بالای ۶۰٪ داشته است. شان‌شان‌شی و همکاران<sup>[11]</sup> نیز در پژوهش دیگری به منظور بهبود و رفع محدودیت‌های ساندویچ پنل‌های لانه زنبوری اقدام به تقویت هسته ساندویچ با استفاده از هسته-شبه‌کای و الیاف کولار نمودند.

بررسی تاثیر ذرات Al3Zr بر روی کنترل مورفولوژی سلولی فوم آلومینیوم نیز توسط سریواستیو و همکاران<sup>[26]</sup> مورد مطالعه قرار گرفت و همچنین فوم‌های نانو کامپوزیتی آلومینیوم-آلومینا با مقاومت فشاری بالا با استفاده از روش فشرده سازی پودر و عامل حباب‌زا توسط اویسی و همکاران<sup>[27]</sup> تولید و آزمایش شد.

با وجود انجام پژوهش‌های مناسب در زمینه ساخت و تولید انواع ساندویچ‌های فوم فلزی، همچنان عدم درک کامل چگونگی تجزیه و رشد حباب‌های هوا و مکانیزم تثبیت کف‌های فلزی از بزرگترین چالش‌های این صنعت به شمار می‌آید<sup>[28,29]</sup>. از این رو به نظر می‌رسد بررسی‌های دقیق‌تر باید در زمینه چگونگی تشکیل و تثبیت حباب‌های هوا و مقایسه میزان تاثیر انواع مواد تثبیت‌کننده در خواص مکانیکی فوم ای فلزی با یکدیگر صورت بگیرد. از طرفی

فوم‌ها در برابر بارهای ضربه ای منجر به استفاده بیشتر آن‌ها در صنعت ساختمان سازی و عایق شده است<sup>[5]</sup>. استحکام پایین فوم‌های تقویت شده با ذرات سرامیکی در برابر بارهای ضربه‌ای منجر به ارائه یک روش جدید به منظور تقویت فلز پایه و افزایش ویسکوزیته مذاب از طریق اضافه نمودن عنصری با میل اکسیداسیون زیاد مانند کلسیم و یا منیزیم به فلز مذاب و هم زدن آن در جو محیط برای تولید فازهای اکسیدی و ذرات بین فلزی جامد و خیس و پراکنده کردن آن‌ها به منظور قرارگیری در دیواره سلولی و تثبیت فوم شد. از طرف دیگر استفاده مستقیم فوم‌های فلزی و به کارگیری آن‌ها بدون هیچ گونه پوششی در صنایع مختلف به دلیل استحکام پایین آن‌ها در برابر نیروهای کششی، احتمال ایجاد خوردگی و آسیب دیدگی در محیط به هیچ‌وجه راه حل مناسبی نمی‌باشد<sup>[17]</sup>. از اینرو تولید کامپوزیت‌های فومی با رویه‌های فلزی، لوله‌ها و مقاطعی با هسته‌های متراکم امری ضروری به نظر می‌رسد. در مقایسه با فوم‌های فلزی، ساندویچ پنل‌های فوم فلزی به واسطه پوسته مستحکم فلزی خارجی امکان اعمال نیروهای کششی بیشتر را فراهم می‌سازد و در صورت آب-بندی کامل لبه‌ها، این مواد به طور کلی از نفوذ گازها و مایعات در امانند<sup>[4]</sup>.

ماریا و همکاران<sup>[2]</sup> در پژوهشی با هدف تولید فوم آلومینیوم به روش متالورژی پودر اقدام به بررسی میزان تاثیر درصد حجمی پودر نیکل در کاهش اختلاف دمای زینتر پودر دولومیت به عنوان عامل حباب‌زا و فلز پایه و همچنین میزان انبساط حجمی فوم به وجود آمده نمودند. آن‌ها مقدار درصد حجمی بهینه پودر نیکل برای دستیابی به حداکثر انبساط حجمی را ۷ درصد اعلام نمودند. امکان استفاده از پودر آلومینیوم و ترکیب آن با عامل حباب‌زا و پس از آن اضافه نمودن به مذاب آلومینیوم به منظور دستیابی به توزیع بهتر و یکنواخت تر منافذ توسط کومار و همکاران<sup>[15]</sup> بررسی شد. همچنین امکان تولید فوم آلیاژ آلومینیوم - منیزیم با ۲ درصد منیزیم به روش مستقیم و عدم استفاده از عامل افزایش دهنده ویسکوزیته توسط بهوجی و همکاران<sup>[14]</sup> مورد مطالعه قرار گرفت. پارامتر چگالی از مهمترین پارامترهای تاثیرگذار در تعیین میزان خواص مکانیکی فوم‌های فلزی است. به عبارتی دیگر می‌توان گفت که خواص مکانیکی این مواد، تابعی از چگالی آن‌هاست. جی یو و جوبنهارت<sup>[18]</sup> با انجام آزمون فشار بر روی نمونه فوم‌های ساخته شده از آلیاژ AlSi12 با مقادیر مختلف چگالی، نشان دادند که افزایش چگالی فوم‌های تولیدی منجر به افزایش استحکام فشاری آن‌ها خواهد شد. همچنین فراهانی و همکاران<sup>[19]</sup> در پژوهشی به بررسی میزان تاثیر درصد حجمی عنصر سیلیسیم در فوم آلیاژ آلومینیوم-سیلیسیم پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد افزایش سیلیسیم تا ۸ درصد منجر به کاهش چگالی و شکل پذیری بیشتر فوم‌های تولیدی خواهد شد. از دیگر آلیاژهای اصلی آلومینیوم عنصر روی می‌باشد که فراهانی و همکاران<sup>[20]</sup> طی

پس از تولید فوم های آلومینیوم با تثبیت کننده های کلسیم و پودر کارباید سیلیسیم به منظور مقایسه مورفولوژی سلولی فوم ها و همچنین اندازه گیری اندازه سلولی از دستگاه اندازه گیری تصویری استفاده شد.

همچنین یکی از ابزارهای مورد استفاده برای بررسی و درک چگونگی مکانیزم تثبیت سلول های ایجاد شده مشاهده ریز-ساختار و چگونگی توزیع و نقش عامل تثبیت کننده فوم در دیواره های سلولی می باشد. به همین منظور پس از تولید فوم با تثبیت کننده های مختلف، متالوگرافی هر یک از نمونه ها انجام و تصاویر توسط میکروسکوپ نوری ثبت گردید. برای اچ نمونه ها نیز از محلول کلر استفاده شد. فوم های ساخته شده در ابعاد  $18 \times 40 \times 130$  میلیمتر برش داده شده و به کمک اسپری فوم پلی یورتان، تحت فشار داخل گیره به ورق آلومینیوم  $1050$  و با ضخامت  $1$  میلیمتر متصل شدند. همچنین برای دست یابی به یک اتصال مناسب بین پوسته و هسته فوم آلومینیوم سطوح مورد نظر قبل از آغشته شدن به چسب مطابق با استاندارد ASTM E864 به خوبی چربی زدایی و تمیز شد.

آزمایش خمش سه نقطه مطابق استاندارد ASTM C393 و با سرعت  $2$  میلیمتر بر دقیقه انجام شد. به منظور اطمینان از صحت نتایج بدست آمده، این آزمون برای هر یک از حالت ها  $4$  مرتبه با شرایط کاملاً یکسان تکرار گردید. همچنین در پژوهش حاضر به منظور شناسایی نحوه شکست ساندویچ پنل های تولیدی، مراحل انجام تست خمش سه نقطه به صورت کامل توسط دوربین فیلم برداری دقیق ضبط شد.

### ۳- نتایج و بحث

مشخصات فیزیکی فوم های تولید شده از قبیل میانگین قطر حفره های ایجاد شده، چگالی فوم ها و میزان تخلخل در جدول ۲ ذکر شده است. که منظور از قطر سلول میانگین اندازه حفره های موجود امده داخل فوم می باشد و درصد تخلخل فوم های تولیدی نیز با استفاده از رابطه ۱ محاسبه می گردد.

$$\varphi = \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right) \times 100\% \quad (1)$$

که در رابطه فوق  $\rho$  چگالی فوم و  $\rho_s$  چگالی جسم غیر متخلخل می باشد.

**جدول ۲) مشخصات فیزیکی فوم های ساخته شده با دو نوع تثبیت کننده.**

تثبیت کننده فوم	قطر سلول (mm)	چگالی (g/cm <sup>3</sup> )	میزان تخلخل %
فلز کلسیم	۰/۷۲	۰/۴۱۳	۸۴/۷
پودر کارباید سیلیسیم	۱/۲۶	۰/۴۰۲	۸۵/۱

تصاویر میکروسکوپی فوم های تولید شده با تثبیت کننده های مختلف در شکل ۱ نشان داده شده است. مشاهده تصاویر میکروساختار فوم های ساخته شده نشان دهنده توزیع یکنواخت

انتخاب فوم هایی با ویژگی های مناسب که قابلیت تحمل نیروهای مورد انتظار صنایع مختلف را داشته باشند نیازمند شناخت کافی از انواع استراتژی های تثبیت فوم های تولیدی می باشد. همچنین تا کنون هیچ پژوهشی به مقایسه و تفاوت میان خواص فوم های تولید با استفاده از این دو استراتژی نپرداخته است.

بنابراین در این مطالعه به بررسی میزان تاثیر عامل تثبیت کننده فوم آلومینیوم شامل فلز کلسیم و پودر کارباید سیلیسیم در مورفولوژی سلولی فوم های تولیدی پرداخته شده است. همچنین خواص مکانیکی ساندویچ پنل با هسته فوم آلومینیوم تحت آزمایش خمش سه نقطه، فشار و همچنین بررسی مد شکست پنل های ساندویچی مورد بحث و بررسی قرار گرفت.

### ۲- مواد و روش انجام پژوهش

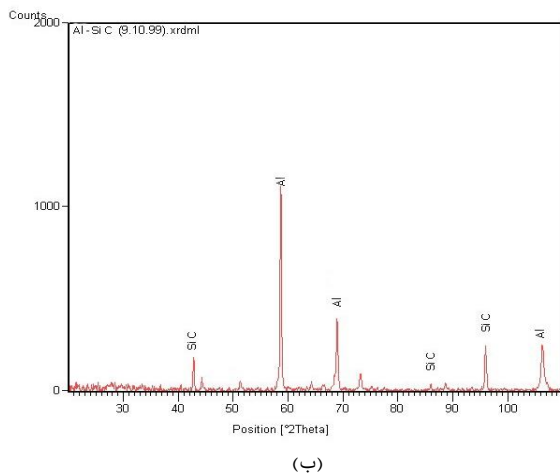
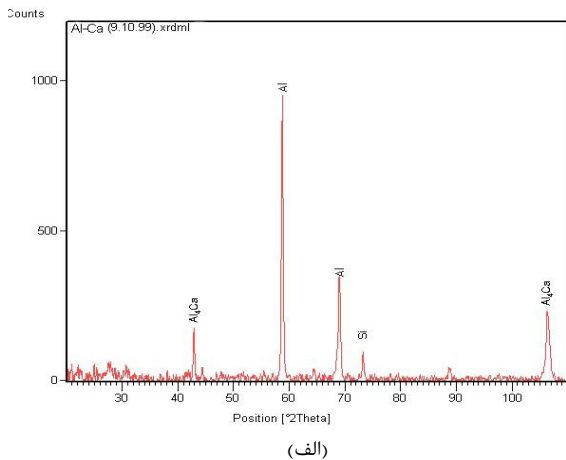
برای تولید فوم آلومینیوم از روش ذوبی آلپوراس استفاده شد [2]. به همین منظور در ابتدا مقدار  $700$  گرم شمش آلیاژ آلومینیوم LM13 مطابق جدول شماره ۱، به منظور تهیه مذاب در دمای  $700$  درجه سانتیگراد، به مدت  $40$  دقیقه در کوره الکتریکی قرار داده شد. در مرحله بعد مقدار  $1/5$  درصد وزنی فلز کلسیم به منظور ایجاد اکسید های تثبیت کننده [30] و افزایش ویسکوزیته به مذاب اضافه و به مدت  $20$  دقیقه با سرعت  $1200$  دور بر دقیقه هم زده شد. پس از آن نیز مقدار  $1/6$  درصد وزنی پودر کربنات کلسیم [31] با میانگین اندازه ذرات  $2$  میکرومتر به مذاب آلومینیوم اضافه شد. در این مرحله نیز ذرات پودر با سرعت  $1200$  دور بر دقیقه درون فلز مذاب همزده شد. در پایان به منظور تجزیه کامل عامل حباب زای و صعود فوم آلومینیوم، به مدت دو الی سه دقیقه در محدوده دمایی  $710$  تا  $730$  درجه سانتیگراد به آن زمان داده شد. در مرحله آخر پس از خروج فوم ساخته شده از کوره، جهت جلوگیری از رشد بیشتر سلول ها و تخریب فوم به سرعت در آب سرد شد.

برای تولید فوم با تثبیت کننده ذرات کارباید سیلیسیم و عامل حباب زای کربنات کلسیم، نیز کاملاً مشابه کلسیم عمل شد با این تفاوت که مقدار  $15$  درصد پودر کارباید سیلیسیم با میانگین اندازه ذرات  $12$  میکرون به منظور افزایش ویسکوزیته مذاب استفاده شد. در این مقاله جهت خلاصه سازی و فهم درست برای ذکر فوم آلومینیوم تثبیت شده با فلز کلسیم از عبارت Al-Ca و برای فوم های تثبیت شده با ذرات کارباید سیلیسیم از عبارت Al-SiC استفاده خواهد شد.

**جدول ۱) ترکیب شیمیایی عناصر تشکیل دهنده شمش آلیاژی آلومینیوم مورد استفاده برای تولید هسته فومی.**

عناصر دیگر	آهن	روی	مس	سیلیسیم	آلومینیوم	اجزاء
۰/۷۲	۰/۸	۱/۸۶	۱/۹	۹/۷۳	۸۴/۹۹	درصد (%)

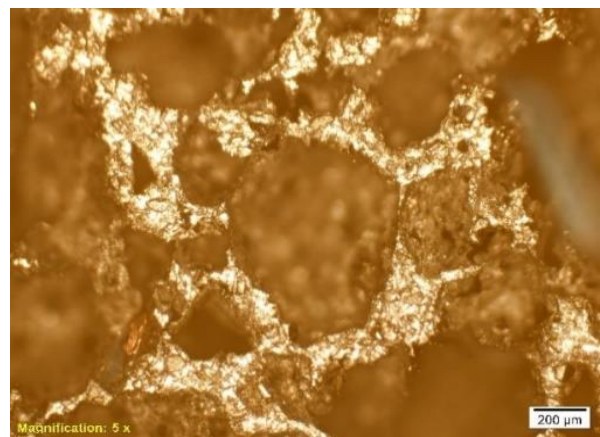
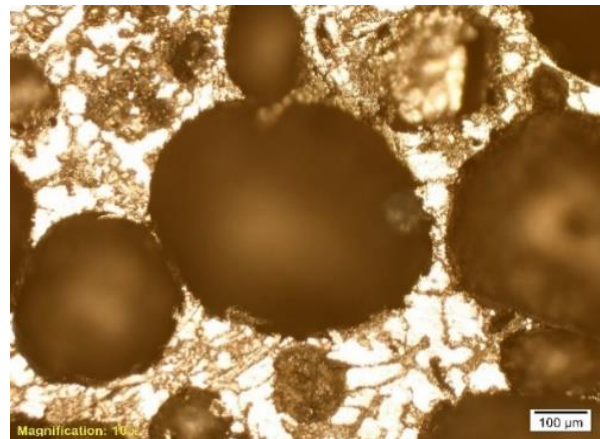
نسبت به فوم‌های حاوی کلسیم نسبت داد<sup>[14]</sup>. مقدار انرژی جذب شده برای ساندویچ پانل Al-Ca برابر ۱/۶ و برای ساندویچ‌های Al-SiC نیز معادل ۱/۰۲ می‌باشد.



شکل ۲) نتایج آزمایش پراش پرتو اشعه ایکس فوم‌های تولید شده با تثبیت کننده (الف) فلز کلسیم و (ب) پودر کاربید سیلیسیم.

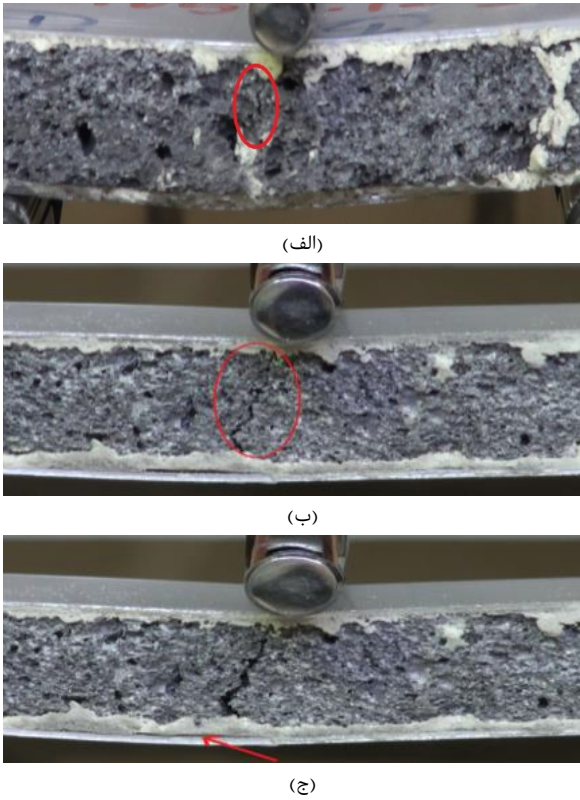
به طور کلی رفتار تغییر شکل ساندویچ پانل‌ها پس از انجام آزمایش تست خمش سه نقطه را به سه شکل تسلیم در اثر برش درهسته-فومی، تسلیم در اثر شکست صفحات و یا تسلیم در اثر فرورفتگی فک اعمال کننده نیرو درون هسته می‌توان دسته بندی نمود<sup>[32]</sup>. نتایج مشاهدات تصاویر ضبط شده نشان داد که با رسیدن نیرو به مقدار ماکزیمم خود ابتدا ساندویچ پانل دچار ترک شده و سپس اتصال ضعیف مابین ورق و هسته منجر به رشد ترک و از بین رفتن اتصال بین ورق زیری و هسته فومی می‌شود و در ادامه کار، سرخوردن و حرکت به سمت بیرون هسته فومی ساندویچ پانل از سمتی که اتصال ورق به هسته از بین رفته است رخ می‌دهد. بنابراین از این نقطه به بعد افت شدید در نمودار نیرو-جابجایی اتفاق افتاده است. گلستانی پور و همکاران نیز وجود یک اتصال ضعیف توسط چسب مابین ورق و هسته را علت کاهش نیروی قابل تحمل و انرژی جذب شده توسط ساندویچ پانل ذکر نموده-اند<sup>[33]</sup>.

ذرات سیلیکون کارباید برای فوم با تثبیت کننده کاربید سیلیسیم و ترکیبات بین فلزی Al<sub>4</sub>Ca برای فوم‌های تثبیت شده با کلسیم در مرز سلول‌ها و در نتیجه تثبیت سلول‌های شکل گرفته در اثر حضور این ترکیبات می‌باشد. از طرفی مقایسه تصاویر متالوگرافی و همچنین مورفولوژی سلول‌های تشکیل شده در هر دو نوع فوم نشان دهنده هندسه دایره‌ای فوم ساخته شده با تثبیت کننده فلز کلسیم و هندسه بی شکل و چروکیده سلول‌ها برای فوم‌های تثبیت شده با ذرات سیلیکون کارباید است. در شکل ۲ نتایج آزمایش پراش پرتو اشعه ایکس برای هر دو نمونه نشان داده شده است.

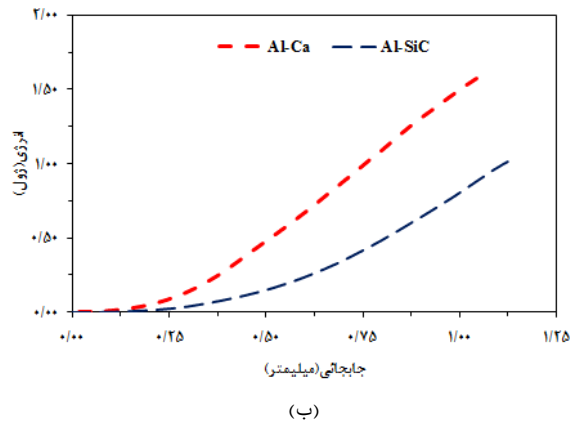
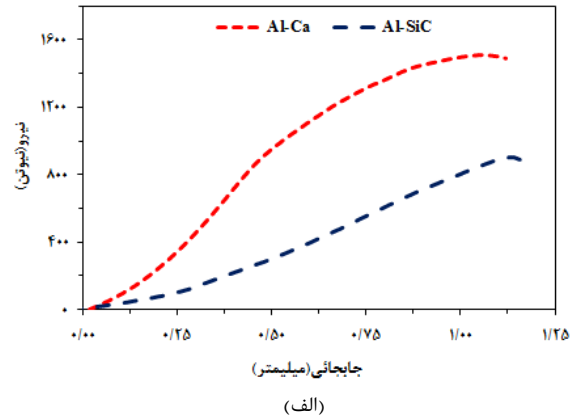


شکل ۱) تصاویر میکروساختار فوم‌های آلومینیومی تولید شده با تثبیت کننده (الف) فلز کلسیم و (ب) پودر کاربید سیلیسیم

منحنی نیرو-جابجایی و انرژی حاصل از انجام آزمایش تست خمش سه نقطه پانل‌های ساندویچی Al-SiC و Al-Ca در شکل ۳ نشان داده شده است. مقایسه نمودار نیرو-جابجایی و انرژی ساندویچ پانل‌ها با هسته فوم آلومینیومی حاوی فلز کلسیم و پودر سیلیکون کارباید نشان داد که هسته‌های فوم شامل کلسیم امکان تحمل بار و جذب انرژی بیشتری را نسبت به پانل‌های ساندویچی شامل هسته با عامل گرانبوی سیلیکون کارباید دارند. علت این امر را می‌توان به شکننده تر بودن فوم‌های حاوی سیلیکون کارباید



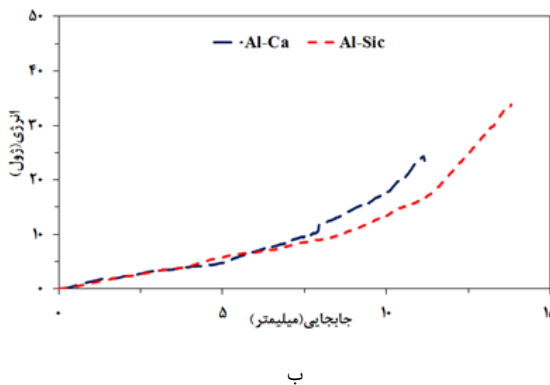
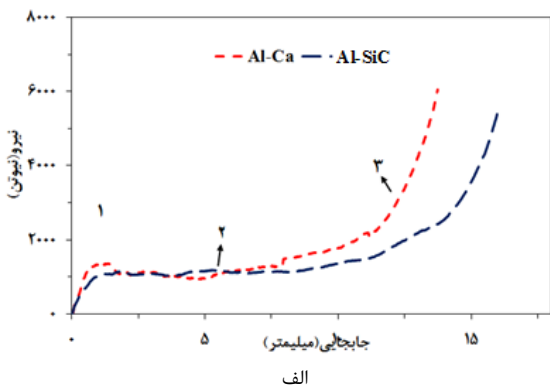
شکل ۴) مراحل تغییر شکل ساندویچ پانل در آزمایش خمش سه نقطه: (الف) شروع ایجاد ترک، (ب) گسترش ترک و (ج) شکست



شکل ۳) مقایسه نمودارهای (الف) نیرو - جابجایی و (ب) انرژی - جابجایی ساندویچ پانل‌ها در آزمایش خمش سه نقطه.

از دیگر موارد مشابه در آزمایش ساندویچ ها نیز محل شروع اولین ترک، سپس رشد و در نهایت شکست کامل هسته ساندویچ بود که در هر دو نمونه پس از شروع فرایند تست و اعمال نیرو توسط فک بالایی دستگاه، در ابتدا ترک در زیر فک اعمال کننده نیرو به وجود آمد (شکل ۴ الف) و در ادامه آزمایش، ترک در راستای عمودی و در محدوده محور تقارن نمونه رشد پیدا کرد (شکل ۴ ب). پس از آن با افزایش نیرو اتصال مابین پوسته و هسته نیز از بین رفت (شکل ۴ ج). مطابق آنچه کبیر و همکاران گزارش نموده اند به این نوع تغییر شکل که پس از آزمایش، نمونه تست به دو تکه مشابه و هم اندازه تقسیم شده باشد تغییر شکل متقارن گویند<sup>[34]</sup>. مراحل تغییر شکل ساندویچ پانل‌ها در حین انجام آزمایش خمش سه نقطه در شکل ۵ نشان داده شده است.

برای مقایسه بهتر نیروهای قابل تحمل و میزان تاثیر نوع عامل تثبیت کننده فوم، آزمایش فشار با سرعت ۵ میلیمتر بر دقیقه برای ساندویچ پانل‌هایی با ابعاد ۲۲/۵×۱۵×۱۵ میلیمتر و برای اطمینان از صحت نتایج آزمایش برای هر نمونه ۴ مرتبه تکرار شد. نمودار نیرو جابجایی و انرژی جابجایی مطابق شکل ۵ بدست آمد.



شکل ۵) مقایسه نمودارهای (الف) نیرو-جابجایی و (ب) انرژی - جابجایی ساندویچ پانل‌ها در آزمایش فشار.

- فوم های تقویت شده حاوی ترکیبات بین فلزی در فلز پایه دارای مورفولوژی بهتری نسبت به فوم های ساخته شده حاوی پودر کاربید سیلیسیم می باشند.
- ساندویچ پانل Al-Ca نسبت به Al-SiC قادر به تحمل تغییر شکل های بیشتری در آزمایش های فشار و خمش سه نقطه ای بوده و لذا فوم های حاوی پودر کاربید سیلیسیم نسبت به فوم های حاوی فلز کلسیم شکل پذیری کمتری دارند.
- مقدار انرژی جذب شده توسط پانل های ساندویچی Ca-Al در حالت خمش و پانل های ساندویچی Al-SiC در حالت فشار بیشتر است.
- عامل اصلی کاهش شدید نیرو در آزمایش خمش سه نقطه پس از رسیدن به نقطه حداکثر نیرو، ضعف در اتصال چسبی بین پوسته و هسته ساندویچی است.

**تاییدیه های اخلاقی:** نویسندگان در تهیه و تنظیم این مقاله رعایت کامل اصول اخلاقی را مدنظر قرار داده اند.

**تعارض منافع:** تمامی مطالب مذکور توسط نویسندگان انجام شده و هیچ فرد یا نهادی در تهیه آن نقش نداشته است.

**منابع مالی:** تمامی منابع مالی این تحقیق توسط نویسندگان مقاله تأمین شده است.

#### منابع

- 1- Khademian N, Peimaei Y. Lightweight materials (LWM) in transportation especially application of aluminum in light weight automobiles (LWA). In International Conference on Interdisciplinary Studies in Nanotechnology 2020 (pp. 1-22).
- 2- Medina Ramirez AM, Vintila RR, Drew RA. Morphology of aluminum alloy foams produced with dolomite via partial sintering of precursors. *Materials*. 2019;12(10):1691.
- 3- Banhart J. Light-metal foams—history of innovation and technological challenges. *Advanced Engineering Materials*. 2016;15(3):82-111.
- 4- Banhart J. Light-metal foams—history of innovation and technological challenges. *Advanced Engineering Materials*. 2013;15(3):82-111.
- 5- Babcsán N, Kumar GV, Murty BS, Banhart J. Grain refiners as liquid metal foam stabilisers. *TRANSACTIONS-INDIAN INSTITUTE OF METALS*. 2007;60(2/3):127.
- 6- Filetin T. Bending Stiffness of Aluminium Foams. *Rad Hrvatske akademije znanosti i umjetnosti. Tehničke znanosti*. 2012 (513= 15):93-116.
- 7- Nieh TG, Higashi K, Wadsworth J. Effect of cell morphology on the compressive properties of open-cell aluminum foams. *Materials Science and Engineering: A*. 2000;283(1-2):105-10.
- 8- Cao Z, Li M, Yu Y, Luo H. Fabrication of aluminum foams with fine cell structure under increased

منحنی های بدست آمده حاصل از آزمایش فشار پنل های ساندویچی در این پژوهش به طور کلی دارای سه منطقه الاستیک، منطقه تنش مسطح و منطقه تراکم اند که مشابه آن در مورد فوم های فلزی نیز مشاهده شده است<sup>[27,35]</sup>. در هنگام بارگذاری های فشاری، فشار وارده تمایل به ایجاد ناحیه تمرکز تنش بر روی فوم دارد و ورق های دو طرف نقش تاثیر گذاری بر رفتار فشاری این پنل های ساندویچی نخواهد داشت<sup>[36]</sup>. بنابراین با ادامه فشار بر روی فوم، تغییر شکل دائم در یک باند در تماس با فک اعمال کننده نیرو و منطقه تمرکز تنش که معمولاً یک دیواره نازک می باشد شروع شده و تسلیم اولین گروه از سلول ها و شروع ناحیه پلاستیک اتفاق خواهد افتاد<sup>[27,35]</sup>. این اتفاق برای ساندویچ های Al-Ca در محدوده ۰/۷۳ میلی متر جابجایی و برای ساندویچ های Al-SiC با کمی افزایش در محدوده ۰/۹۷ میلی متر رخ داد. پس از این مرحله و شروع ناحیه پلاستیک در محدوده زیادی از تغییر شکل نمودار شاهد نیروی تقریباً ثابتی بوده که میانگین این نیرو همان نیرو مسطح است. در این محدوده نوسانات مکرر نمودار به علت تخریب دیواره های سلولی و کاهش نیرو و مجدداً نزدیک شدن سطوح داخلی سلول ها به یکدیگر منجر به افزایش نیرو خواهد شد. محدوده نیروی مسطح برای ساندویچ های Al-Ca تا ۱۱/۱۶ میلی متر و ساندویچ های Al-SiC تا ۱۳/۸ میلی متر جابجایی ثبت گردید. در ادامه روند افزایشی فشار، تخریب کلیه سلول ها و تماس سطح آن ها به یکدیگر، شیب منحنی ناگهان دچار یک تغییر بزرگ شد. این محدوده را که حاصل افزایش تراکم است، کرنش چگالش گویند<sup>[35]</sup>. همچنین همانطور که از نمودار مشخص است شروع منطقه تراکم با کاهش جزئی نیرو و سپس افزایش آن همراه بود. این نقاط با رسم علامت پیکان برای هر دو ساندویچ بر روی شکل ۵ (الف) نشان داده شده است. همچنین مشاهده نحوه تغییر شکل نمونه های تحت فشار و خروج برخی از قطعات دیواره سلولی از سلول های مرزی و تکه تکه شدن فوم ها نیز دلیل دیگری بر شکست ترد پنل های ساندویچی تحت آزمایش فشار می باشد<sup>[37,38]</sup>.

#### ۴- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر بررسی تجربی میزان تاثیر نوع ماده مورد استفاده جهت افزایش ویسکوزیته فلز مذاب بر روی خواص خمشی و فشاری ساندویچ پنل های فوم آلومینیوم مورد بحث و بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از آزمایشات متالوگرافی، پراش پرتو اشعه ایکس، خمش سه نقطه و فشار به صورت خلاصه به شرح ذیل است.

- حضور ذرات جامد کاربید سیلیسیم در روش اضافه نمودن ذرات سرامیکی جامد به فلز مذاب و تشکیل ترکیبات بین فلزی Al<sub>4</sub>Ca در روش تشکیل درجای اکسیدها و ذرات بین فلزی در فلز پایه عامل اصلی پایداری فوم می باشد.

- 26- Srivastava N, Bhagavath S, Karagadde S. Effect of in situ Al<sub>3</sub>Zr particles on controlling the pore morphology of Al6061 alloy foams. *Materials Today Communications*. 2021;26:101853.
- 27- Oveisi H, Geramipour T. High mechanical performance alumina-reinforced aluminum nanocomposite metal foam produced by powder metallurgy: fabrication, microstructure characterization, and mechanical properties. *Materials Research Express*. 2020;6(12):1250c2.
- 28- Neu TR, Kamm PH, von der Eltz N, Seeliger HW, Banhart J, García-Moreno F. Correlation between foam structure and mechanical performance of aluminium foam sandwich panels. *Materials Science and Engineering: A*. 2021;800:140260.
- 29- Zhou X, Li Y, Chen X. Development of AlMg35-TiH<sub>2</sub> composite foaming agent and fabrication of small pore size aluminium foams. *Journal of Materials Processing Technology*. 2020;283:116698.
- 30- Nayebe B, Mehrabian M, Asl MS, Shokouhimehr M. Nanostructural approach to the thickening behavior and oxidation of calcium-stabilized aluminum foams. *Materials Chemistry and Physics*. 2018 1;220:351-9.
- 31- Seo CH, Jeong MJ, Jung IY, Hur BY. Comparative study on TiH<sub>2</sub> and CaCO<sub>3</sub> for fabrication of Mg alloy foams. In *Materials Science Forum 2008* (Vol. 569, pp. 273-276). Trans Tech Publications Ltd.
- 32- Li Z, Zheng Z, Yu J, Qian C, Lu F. Deformation and failure mechanisms of sandwich beams under three-point bending at elevated temperatures. *Composite structures*. 2014;111:285-90.
- ۳۳- گلستانی پور، مسعود، باباخانی، زبرجد، سیدمجتبی. بررسی اثر استحکام اتصال چسبی در رفتار خمش سه نقطه‌ای پنل‌های ساندویچی با هسته فوم کامپوزیتی Al A356/SiCp. *فصلنامه علمی-پژوهشی مواد نوین*. ۲۰۱۷. 22;7(27):85-94.
- 34- Kabir K, Vodenitcharova T, Hoffman M. Response of aluminium foam-cored sandwich panels to bending load. *Composites Part B: Engineering*. 2014;64:24-32.
- 35- Guden M, Yüksel S. SiC-particulate aluminum composite foams produced from powder compacts: foaming and compression behavior. *Journal of materials science*. 2006;41:4075-84.
- 36- Gibson LJ, Ashby MJ. *Cell. Solids: Struct. Prop.*
- 37- Golestanipour M, Mashhadi HA, Abravi MS, Malekjafarian MM, Sadeghian MH. Manufacturing of Al/SiCp composite foams using calcium carbonate as foaming agent. *Materials Science and Technology*. 2011;27(5):923-7.
- 38- Luo Y, Yu S, Li W, Liu J, Wei M. Compressive behavior of SiCp/AlSi9Mg composite foams. *Journal of Alloys and Compounds*. 2008;460(1-2):294-8.
- pressure. *Advanced Engineering Materials*. 2016;18(6):1022-6.
- 9- Duarte I, Ferreira JM. Composite and nanocomposite metal foams. *Materials*. 2016 28;9(2):79.
- 10- Dudka A, Garcia-Moreno F, Wanderka N, Banhart J. Structure and distribution of oxides in aluminium foam. *Acta Materialia*. 2008;56(15):3990-4001.
- 11- Heim K, Vinod-Kumar GS, García-Moreno F, Rack A, Banhart J. Stabilisation of aluminium foams and films by the joint action of dispersed particles and oxide films. *Acta Materialia*. 2015;99:313-24.
- 12- Helwig HM, Garcia-Moreno F, Banhart J. A study of Mg and Cu additions on the foaming behaviour of Al-Si alloys. *Journal of materials science*. 2011;46(15):5227-36.
- 13- Banhart J. Metal foams: production and stability. *Advanced engineering materials*. 2006;8(9):781-94.
- 14- Bhogi S, Mukherjee MJ. Foam stabilization by magnesium. *Materials Letters*. 2017;200:118-20.
- 15- Sasikumar S, Georgy K, Mukherjee M, Kumar GV. Foam stabilization by aluminum powder. *Materials Letters*. 2020;262:127142.
- 16- Manufacturing of Composite Metal Foam By Directly, (2010) 193-196.
- 17- Banhart J. Light-metal foams—history of innovation and technological challenges. *Advanced Engineering Materials*. 2019;15(3):82-111.
- 18- Yu CJ, Eifert HH, Banhart J, Baumeister J. Metal foams. *Advanced materials & processes*. 1998; 154(5):45-.
- 19- Farahani M, Hossein Elahi S, Rezaei Ashtiani HR. Effect of silicon content on mechanical properties and progressive collapse behavior of closed-cell aluminum foams. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2021;74(12):3145-54.
- 20- Farahani MR, Rezaei Ashtiani HR, Elahi SH. The effect of adding silicon and zinc elements on the mechanical properties of closed-cell aluminum-based foams. *International Journal of Metalcasting*. 2023;17(2):910-21.
- 21- Mirbagheri SM, Taftah R, Sardashti K. Assessment of TiH<sub>2</sub> and CaCO<sub>3</sub> Blowing Agents on Structure and Properties of the Al-7% Si-3% SiC Composite Metal Foam. *Journal of Advanced Materials in Engineering (Esteghlal)*. 2011;30(1):57-72.
- 22- Styles M, Compston P, Kalyanasundaram S. The effect of core thickness on the flexural behaviour of aluminium foam sandwich structures. *Composite Structures*. 2007;80(4):532-8.
- 23- Yan LL, Han B, Yu B, Chen CQ, Zhang QC, Lu TJ. Three-point bending of sandwich beams with aluminum foam-filled corrugated cores. *Materials & Design*. 2014;60:510-9.
- 24- Shunmugasamy VC, Mansoor B. Aluminum foam sandwich with density-graded open-cell core: Compressive and flexural response. *Materials Science and Engineering: A*. 2018;731:220-30.
- 25- Shi S, Sun Z, Hu X, Chen H. Flexural strength and energy absorption of carbon-fiber-aluminum-honeycomb composite sandwich reinforced by aluminum grid. *Thin-Walled Structures*. 2014 ;84:416-22.