



The Effect of the Number of Immersion Times in Slurry on the Microstructure and Mechanical Properties of Aluminum Foam Produced by Slurry Casting Method

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Rabieian F.¹ MSc,
Hosseinimonazzah A.^{*1} PhD,
Golshan Shargh S.² MSc

How to cite this article

Rabieian F, Hosseinimonazzah A, Golshan Shargh S. The Effect of the Number of Immersion Times in Slurry on the Microstructure and Mechanical Properties of Aluminum Foam Produced by Slurry Casting Method. Modares Mechanical Engineering. 2021; 21(1):1-9.

¹ Department of Materials and Metallurgy, Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
² Atashin Panjeh Metallurgical Company, East Azerbaijan, Tabriz, Aali Nasab Industrial Town, Sanat Yak St

*Correspondence

Address: Department of Materials and Metallurgy, Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

Phone: +98 (21) 73932711

Fax: -

a_hosseinimonazzah@sbu.ac.ir

Article History

Received: July 25, 2020

Accepted: November 19, 2020

ePublished: January 18, 2021

ABSTRACT

Slurry casting method is a novel process to produce metal forms, which makes it possible to produce a porous structure with open cell. In the present study, the microstructure and compressive behavior of aluminum foams produced by slurry casting method, under different number of immersion times were investigated. For the production of aluminum foams with different cell sizes, polyurethane preforms with characteristics of 45, 55 and 65 ppi were selected, and after immersing in a slurry having a solid mass of 88% and removing the excess semiliquid mixture, the samples were sintered at 630°C. The size of polyurethane perform cell as well as the number of immersion times control the microstructure and compression performance of porous structures. The results of the study showed that the portability of porous aluminum increases by decreasing the size of preform cell or increasing the number of immersion times, which leads to thicker strut. In addition, the probability of crack existence, exactly at the corner of structures, decrease via enhancing the thickness of strut. Meanwhile, excessive increase in the number of immersion, i.e. third times, was associated with some closed-cells which results in strain localization and stress concentration. Therefore, the maximum plateau stress as well as the superior energy absorption capacity was observed in the sample having the minimum preform pore sizes which was immersed for two times in the aluminum slurry.

Keywords: Aluminum Foam, Slurry Casting, Number of Immersion Times, Microstructure, Compressive Behavior

CITATION LINKS

[1] DIN 50134, Compression test of metallic cellular materials [2] Metallic foams: their production, properties and applications [3] A review on manufacturing and application of open-cell metal foam [4] Chemical deposition method for metal chalcogenide thin films. Materials Chemistry and physics [5] Synthesis of open-cell metal foams by templated directed vapor deposition [6] Characterisation and application of cellular metals and metal foams [7] High-porosity mullite ceramic foams prepared by selective laser sintering using fly ash hollow spheres as raw materials [8] Main process parameters for manufacturing open-cell Zn-22Al-2Cu foams by ... [9] The effect of slurry composition on the microstructure and mechanical properties ... [10] Fabrication and energy absorption properties of titanium foam ... [11] Compressive performance and deformation mechanism of the dynamic gas injection aluminum foams [12] Rheological properties of commercially pure titanium slurry for metallic foam production ... [13] Deformation processes of porous metals and metallic foams [14] Experimental study of energy absorption in a close-celled aluminum foam ... [15] Metal foams [16] Effects of porosity and pore size on the compressive properties of closed-cell ... [17] Open cell aluminum foams produced by polymer impregnation method [18] Gas absorption accompanied by chemical reaction in ... [19] Experiment development of foam slurry materials [20] The effects of organic template and thickening agent ... [21] An improved polymeric sponge replication method for biomedical porous titanium scaffolds [22] Lightweight open cell aluminum foam for superior mechanical and electromagnetic interference shielding properties [23] Development of Al foams by a low-cost salt replication method for industrial applications

تاثیر تعداد دفعات لایه‌نشانی دوغاب بر ریزساختار و خواص مکانیکی فوم آلومینیوم تولید شده به روش ریخته‌گری دوغابی

فاطمه ربیعیان MSc

گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

عسل حسینی منزله PhD*

استادیار، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

سینا گلشن شرق MSc

شرکت متالورژی آتشین پنجه، آذربایجان شرقی، تبریز، شهرک صنعتی عالی نسب، خیابان صنعت یک

چکیده

روش ریخته‌گری دوغابی، فرآیندی نوین جهت تولید فوم‌های فلزی است که امکان تولید ساختاری متخلخل با سلول باز را فراهم می‌نماید. لذا در پژوهش حاضر، ریزساختار و رفتار فشاری فوم‌های آلومینیومی تولید شده با استفاده از روش ریخته‌گری دوغابی با تعداد دفعات متفاوت در لایه‌نشانی دوغاب، مورد مطالعه قرار گرفته است. جهت تولید فوم‌های آلومینیومی با اندازه سلول متفاوت، پیش‌ماده‌هایی از جنس پلی‌یورتان با سه اندازه حفره متفاوت انتخاب شده و پس از غوطه‌وری در دوغاب با جرم جامد مناسب، تف‌جوشی در دمای ۶۳۰ درجه سانتیگراد انجام گرفت. متغیرهای اصلی فرآیند در این پژوهش، اندازه حفرات پیش‌ماده اولیه و تعداد دفعات لایه‌نشانی دوغاب می‌باشد، به‌گونه‌ای که ریزساختار نمونه‌های متخلخل و رفتار فشاری نمونه‌ها به‌ازای یک، دو و سه مرتبه لایه‌نشانی دوغاب بر پلی‌یورتان‌هایی با اندازه منافذ مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج بررسی‌ها نشان داد که ریزساختار و رفتار فشاری نمونه‌ها متأثر از اندازه حفرات پیش‌ماده اولیه و تعداد دفعات لایه‌نشانی در دوغاب است. با کاهش اندازه حفرات پلی‌یورتان اولیه و تعدد دفعات غوطه‌وری در دوغاب، قابلیت حمل فوم نهایی افزایش یافته، همچنین احتمال بروز ترک با تکرار لایه‌نشانی کاهش می‌یابد. هرچند در صورت لایه‌نشانی مکرر که همراه با عدم خروج دوغاب اضافی است، تعدادی از سلول‌ها بسته شده و در نتیجه غیریکنواختی در ضخامت دیواره و افزایش تمرکز تنش مشاهده می‌شود. به‌گونه‌ای که در نمونه‌ای با کمینه‌ی اندازه منافذ پیش‌ماده، بهینه میزان جذب انرژی و تنش پایا به‌ازای دو مرتبه غوطه‌وری در دوغاب مشاهده شده است.

کلیدواژه‌ها: فوم آلومینیومی، ریخته‌گری دوغابی، دفعات لایه‌نشانی دوغاب، ریزساختار، رفتار فشاری

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۱۷

*نویسنده مسئول: a_hosseinimonazzah@sbu.ac.ir

۱- مقدمه

در طبقه‌بندی جدید، مواد به گروه‌های شش‌گانه فلزات، سرامیک‌ها، پلیمرها، کامپوزیت‌ها، مواد طبیعی و مواد متخلخل (فوم‌ها) تقسیم می‌شوند. فوم جامد که شامل حداقل ۵۰٪ فاز گازی است، می‌تواند سلول بسته یا سلول باز و یا نیمه باز

باشد^[1]. هرچند میزان استحکام و پایداری ساختارهای متخلخل سلول بسته، بدلیل احاطه شدن سلول با مواد جامد بیشتر از فوم‌های سلول باز و نیمه‌باز است، اما جذب انرژی صوت و حرارت در ساختارهای متخلخل سلول باز، بدلیل راه بدر بودن حفرات و حبس قابل توجه امواج بیشتر بوده، لذا این دسته از مواد به‌عنوان عایق حرارتی، عایق صوتی و جاذب آلاینده‌های محیطی استفاده می‌شود^[2]. میزان جذب انرژی صوت و حرارت علاوه بر ریزساختار فوم‌ها، تابع ترکیب شیمیایی و ماهیت پیوند بین اتم‌ها و یا ملکول‌های ماده است^[2]. لذا از منظر جزئی‌تر، مواد متخلخل به سه دسته سرامیکی، پلیمری و فلزی تقسیم می‌شوند^[3]. در این بین فوم‌های فلزی گروه جدیدی از فوم‌ها هستند، به‌گونه‌ای که امروزه ساختارهای متخلخل فلزی به صورت گسترده‌ای در حوزه‌های پزشکی، انرژی و محیط زیست مورد استفاده قرار می‌گیرند^[3].

فوم‌های فلزی به سه روش کلی جامد، مایع و گاز تولید می‌شود^[4]. هرچند روش گازی جهت تولید نانوساختارها و ایجاد پوشش مناسب است^[5]، اما حجم انبوه قطعات متخلخل با استفاده از روش جامد و یا مذاب تولید می‌شود^[2]. متالورژی پودر^[6] و تف‌جوشی با کمک لیزر انتخابی^[7] (Selective Laser Sintering) از روش‌های تولید ساختارهای متخلخل در حالت جامد است.

در مقایسه بین روش‌های جامد و مذاب جهت تولید ساختارهای متخلخل، تنوع روش‌های فوم‌سازی در روش مذاب بیشتر بوده و به چهار طریق ریخته‌گری گریز از مرکز^[8] (Centrifugal)، ریخته‌گری دوغابی^[9] (Slurry Casting)، ریخته‌گری با حضور مواد فضا‌ساز^[10] (Space holder) و ریخته‌گری با تزریق گاز^[11] (Gas Injection) صورت می‌گیرد. لازم به‌ذکر است که در بین روش‌های متفاوت ساخت حالت مذاب، فرآیند ریخته‌گری دوغابی ساده‌تر بوده و نیاز به تجهیزات کمتری دارد^[2].

در ریخته‌گری دوغابی، یک دوغاب مناسب برای روش ریخته‌گری که معمولاً شامل حلال، پراکنده‌ساز، اتصال دهنده و پودر فلزی است، جهت تولید ساختارهای متخلخل سلول باز، مورد استفاده قرار می‌گیرد^[12]. عمده‌تاً چهار عامل کلیدی، کنترل‌کننده‌ی رفتار مکانیکی و فیزیکی قطعه متخلخل نهایی می‌باشد^[9]: ۱- جرم دوغاب که خود تابعی از جرم و چگالی پودر فلزی، اتصال‌دهنده و عامل پراکنده‌ساز است؛ ۲- اندازه تخلخل در پیش‌ماده پلیمری؛ ۳- درصد حجمی اتصال دهنده و ۴- جنس فوم پیش‌ماده.

در بین خواص مختلف ساختارهای متخلخل، بررسی ریزساختار فوم‌ها، میزان جذب انرژی و نسبت استحکام فشاری به وزن از جمله مهم‌ترین آزمون‌هایی‌ست که رفتار فوم‌سازی ماده‌ی متخلخل و قابلیت کارایی آن در صنایع مختلف را پیش‌بینی می‌نماید^[13]. دلیل ارزیابی استحکام فشاری بجای استحکام کششی، وجود خواص کششی ضعیف دیوار سلول‌ها و تخریب و

درصد حجمی اتصال دهنده و pH دوغاب از دیگر متغیرهای روش ریخته‌گری دوغابی هستند که مستقیماً بر گرانروی دوغاب تأثیر می‌گذارند. با افزایش مقدار اتصال‌دهنده، گرانروی افزایش یافته و انتقال دوغاب به تمام نقاط پیش‌ماده پلیمری به‌صورت کامل صورت نمی‌گیرد. در صورتی‌که با کاهش pH دوغاب و از بین رفتن پیش‌ماده، تخریب فوم در حین تفجوشی رخ می‌دهد. شایان ذکر است، هر دو عامل مذکور سبب کاهش مقاومت فشاری فوم می‌شوند [20].

در سال ۲۰۱۷، وانگ و همکارانش [21]، به بررسی اثر سرعت چرخش دوغاب و تعداد دفعات لایه‌نشانی دوغاب تیتانیومی بر پیش‌ماده پلیمری پرداختند. نتیجه بررسی ایشان نشان داد که در سرعت‌های دوران یکسان، با افزایش تعداد دفعات غوطه‌وری پیش‌ماده در دوغاب، ضخامت دیواره‌های بیرونی فوم پس از تفجوشی بیش‌تر از دیواره‌های درونی می‌گردد. بنابراین هنگام آزمون فشار، ابتدا لایه‌های درونی شروع به فروپاشی کرده و سبب افت استحکام می‌گردند. همچنین با ثابت در نظر گرفتن تعداد دفعات غوطه‌وری و افزایش سرعت دوران، ضخامت دیواره‌های سلول‌ها در تمام نقاط فوم همگن بوده که همراه با بهبود استحکام فشاری است.

برمبنای مطالعات صورت‌گرفته، بیشتر پژوهش‌ها در زمینه فوم‌های فلزی تولید شده به روش ریخته‌گری دوغابی در حوزه تیتانیوم می‌باشد. با توجه به ویژگی‌های بارز آلیاژهای آلومینیوم مانند سهولت در تهیه‌ی مواد اولیه، قیمت پایین، وزن اندک و نسبت استحکام به وزن بالا به نظر می‌رسد بررسی رفتار فوم‌پذیری و مکانیکی آلیاژهای فوق با استفاده از روش ریخته‌گری دوغابی جذاب باشد. نقطه ضعف فوم‌های آلومینیومی تولید شده به روش ریخته‌گری دوغابی، اکسیداسیون آن‌ها به‌هنگام تولید دوغاب و فرآیند تفجوشی است، چنانچه امکان بررسی رفتار مکانیکی فوم آلومینیوم تولید شده توسط زمن و همکارانش [17] به دلیل اکسیدشدن ساختار فوق در کوره معمولی میسر نبود. در حقیقت بدلیل اکسیداسیون آلومینیوم در کوره‌های معمولی و تولید آلومینا، دمای تفجوشی قطعه از ۶۶۷ درجه سانتیگراد به حدود ۱۱۵۰ درجه سانتیگراد افزایش می‌یابد. بنابراین در پژوهش حاضر، تفجوشی در بستری از گرافیت جهت جلوگیری از اکسیداسیون آلومینیوم و کاهش دمای تفجوشی و بهبود استحکام مکانیکی ساختارهای متخلخل پیشنهاد شده و انجام گرفته است. همچنین جهت بهبود استحکام مکانیکی فوم، تعدد دفعات غوطه‌وری به‌عنوان متغیر در نظر گرفته شده و بهینه دفعات غوطه‌وری جهت دستیابی به ساختاری متخلخل با سلول باز و استحکام بیشینه تعیین شده است.

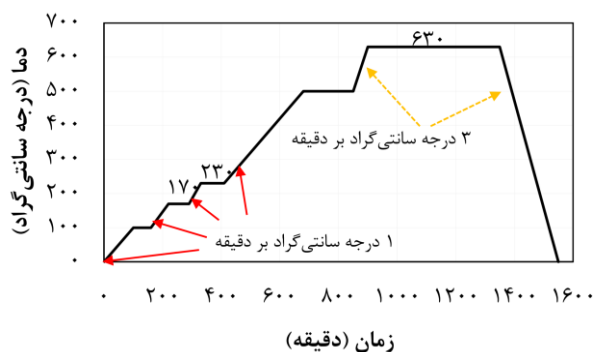
شکستن آن‌ها به‌ازای بارهای کوچک است. لذا با استفاده از آزمون فشار، مقاومت دیوار سلول‌ها و بشکه‌ای شدن آن‌ها اندازه‌گیری می‌شود [12].

منحنی تنش-کرنش فشاری دارای سه منطقه الاستیک، تنش پایا (Plateau Stress) و مرحله‌ی چگالش نهایی می‌باشد. تنش پایا و کرنش شکست به‌صورت همزمان بر روی ظرفیت انرژی (مساحت زیرمنحنی تنش-کرنش) تأثیر می‌گذارند [14]. افزایش تنش پایا با انتخاب یک آلیاژ مناسب و با توجه به چگالی مربوط به آن صورت می‌گیرد [15]. به‌گونه‌ای که با افزایش اندازه‌ی تخلخل‌ها، تنش مرحله‌ی دوم افزایش و در ادامه بر اثر بالا رفتن چگالی موجود در پیش‌ماده به‌صورت غیریکنواخت، تنش پایا کاهش می‌یابد، در صورتیکه کرنش مرحله‌ی دوم همواره روندی صعودی دارد. همچنین اندازه‌ی تخلخل‌ها تأثیری کوچکی بر کرنش چگالش داشته و مرحله‌ی چگالش نیز انرژی جذب می‌کند [16]. در پژوهشی مشابه بر روی آلیاژ تیتانیوم، مشخص گردید که با افزایش اندازه‌ی حفرات در هر اینچ مربع، ضخامت دیواره کاهش یافته که همراه با افت استحکام فشاری است [10].

با توجه به تعدد متغیرها در روش ریخته‌گری دوغابی، ساخت نمونه‌ی متخلخل توسط این روش نسبت به سایر روش‌های ریخته‌گری با چالش‌های بیشتری روبرو است. به‌عنوان مثال، جرم جامد دوغاب (Slurry Loading)، ریزساختار و خواص مکانیکی فوم را بشدت تحت تأثیر قرار می‌دهد [12].

تأثیر جرم دوغاب بر رفتار فشاری فوم اینکونل تولید شده به روش ریخته‌گری دوغابی توسط ان. کوخو و همکارانش [9] مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بررسی ایشان نشان داد که با افزایش جرم جامد دوغاب، به دلیل افزایش ضخامت دیواره‌ی سلول‌ها و نیز بسته شدن برخی از تخلخل‌ها، میزان تنش فشاری در منطقه اول افزایش و میزان کرنش منطقه‌ی دوم کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر افزایش جرم دوغاب سبب افزایش استحکام فشاری فوم اینکونل می‌گردد. در ادامه، زمن و همکارانش [17] دریافتند که با افزایش زمان تفجوشی در جرم دوغاب ثابت، استحکام فشاری بهبود می‌یابد. همچنین با افزایش جرم دوغاب در زمان تفجوشی ثابت، سلول‌هایی با دیواره‌های ضخیم‌تر بدلیل افزایش گرانروی دوغاب تشکیل می‌شود.

متغیر دیگر روش ریخته‌گری دوغابی، نوع پیش‌ماده پلیمری مورد استفاده است. دلیل اهمیت بالای عامل فوق، میزان تخریب و واکنش پیش‌ماده با دوغاب قبل و یا در حین فرآیند تفجوشی است [18]. همچنین پیش‌ماده‌ها بر روی استحکام و مقاومت فوم نهایی تأثیر می‌گذارند. به‌گونه‌ای که ممکن است قسمتی از دیواره فوم پس از تفجوشی، بسته به جنس پیش‌ماده از بین برود [19]. به‌عنوان مثال، واکنش دوغاب تیتانیومی با پیش‌ماده‌ای از جنس پلی‌اتر نسبت به پلی‌استر بیشتر بوده و همراه با ایجاد ترکیبات ناخواسته است [20].



شکل ۱) گام‌های حرارتی در فرآیند تفجوشی

در ادامه، چگالی ساختارهای متخلخل با استفاده از استاندارد ASTM B962 تعیین شده و سپس جهت بررسی مورفولوژی و ساختار پودر آلومینیوم مصرفی و فوم تولیدی از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل Cam Scan MV2200 استفاده گردید. همچنین جهت بررسی آنالیز پودر مصرفی، دستگاه ایکس‌آر دی (XRD (D8 ADVANCE) بکار گرفته شد. در نهایت آزمون فشار با اعمال نرخ کرنش ۰/۰۱ بر میلی‌متر دقیقه و مطابق با استاندارد DIN1621-94، توسط دستگاه کشش و فشار Zwick/Roell مدل Z250 انجام شد.

در جدول ۲ نمایه‌ی بکار رفته برای نه گروه از نمونه‌های مختلف ارائه شده است. شایان ذکر است نحوه کدگذاری نمونه‌ها بدین صورت است که در سمت چپ به ترتیب جنس پیش‌ماده، اندازه تخلخل پیش‌ماده (۴۵، ۵۵، ۶۵)، جرم دوغاب، و نوع اتمسفر (A: هوا و G: بستر گرافیتی) ارائه شده است.

جدول ۲) نمایه‌های بکار رفته برای نمونه‌های تولید شده در این پژوهش

ردیف	کد نمونه	ردیف	کد نمونه	ردیف	کد نمونه
۱	PU45-88-A-G-1	۴	PU45-88-A-G-2	۷	PU45-88-A-G-3
۲	PU55-88-A-G-1	۵	PU55-88-A-G-2	۸	PU55-88-A-G-3
۳	PU65-88-A-G-1	۶	PU65-88-A-G-2	۹	PU65-88-A-G-3

۳- نتایج و بحث

پودر آلومینیوم مصرفی در این پژوهش با استفاده از فرآیند افشانش گازی توسط شرکت متالورژی پودر خراسان تولید شده است. در شکل ۲ الگوی ایکس‌آر دی و تصویری از ریزساختار پودر اولیه نشان داده شده است. مطابق با داده‌های پراش اشعه ایکس، پیک‌های آلومینیوم با شدت بالا قابل مشاهده هستند، که نشان‌دهنده خلوص بالای ماده‌ی اولیه است. همچنین باتوجه به بکارگیری گاز خنثی در افشانش گازی، مورفولوژی پودرها به صورت کروی بوده و اندازه ذرات زیر ۲۰ میکرومتر می‌باشد.

۲- مواد و روش تحقیق

جهت تولید فوم آلومینیوم، در ابتدا دوغابی با جرم جامد ۸۸٪ تهیه گردید. بدین جهت، آب مقطر پی‌وی‌ای (PVA) به عنوان عامل اتصال‌دهنده و دولاپیکس (Dolapix) به عنوان عامل پراکنده‌ساز، در دمای محیط مخلوط شده و به مدت نیم ساعت جهت انحلال کامل توسط همزن مغناطیسی در دمای ۸۰ درجه سانتیگراد مخلوط گردید. در ادامه، جهت جلوگیری از اشتعال‌پذیری پودر آلومینیوم، پس از افت دمای محلول تا حدود ۴۵ درجه سانتیگراد، پودر فلزی با اندازه‌ی متوسط ۶ میکرومتر اضافه گردیده و جهت اختلاط کامل به مدت ۱۰ دقیقه هم‌زده شد. در جدول ۱، مقدار مواد اولیه مصرفی جهت تهیه دوغاب ذکر شده است.

جدول ۱) مواد اولیه جهت تهیه دوغاب آلومینیوم

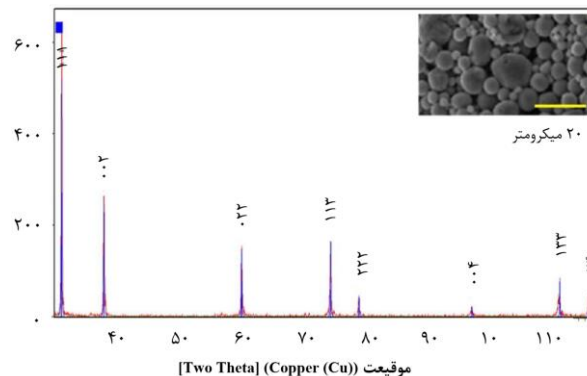
مواد مورد نیاز	مقدار
پودر آلومینیوم	۳۰ g
دولاپیکس	۰/۶ cc
پلی‌وینیل‌الکل	۰/۶ g
آب مقطر	۲۰ cc

در ادامه، غوطه‌وری اسفنج‌های مکعب مستطیل با ابعاد ۱۰×۲۰×۲۰ میلی‌متر، در دوغاب به مدت ۳۰ دقیقه انجام گرفته و سپس دوغاب اضافی توسط وزنه ۲۰ گرمی برای پیش‌ماده‌ای با مشخصه تخلخل ۴۵ پی‌پی‌آی (ppi) و وزنه ۵۰ گرمی برای پیش‌ماده‌های با مشخصه تخلخل ۵۵ پی‌پی‌آی و ۶۵ خارج گردید. با افزایش عدد پی‌پی‌آی، پیش‌ماده چگال‌تر شده و قابلیت خروج سیال از منافذ کاهش می‌یابد، که سبب اعمال فشار بیشتر جهت خروج دوغاب اضافی از پیش‌ماده آغشته به دوغاب می‌گردد. پس از خروج دوغاب اضافی، فرآیند خشک شدن نمونه‌ها در دمای محیط به مدت ۲۴ ساعت صورت پذیرفت. نمونه‌ها بر مبنای تعداد دفعات غوطه‌وری در دوغاب در قالب سه دسته تقسیم شده و برای دسته اول، گام‌های غوطه‌وری در دوغاب، خروج دوغاب و خشک شدن یک مرتبه و برای دسته دوم و سوم، مراحل فوق به ترتیب دو و سه مرتبه تکرار شد. سپس کلیه نمونه‌ها جهت تفجوشی داخل کوره و در بستر گرافیت قرار گرفتند. گام‌های فرآیند تفجوشی در شکل ۱ نشان داده شده است. مطابق با شکل، تفجوشی فوم آلومینیوم تولیدی دارای ۵ مرحله می‌باشد، که شامل حذف آب از نمونه خام در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد، خروج دولاپیکس در دمای ۱۷۰ درجه سانتیگراد، حذف پی‌وی‌ای در دمای ۲۳۰ درجه سانتیگراد، حذف پیش‌ماده در دمای ۵۰۰ درجه سانتیگراد و تفجوشی آلومینیوم در دمای ۶۳۰ درجه سانتیگراد می‌باشد.

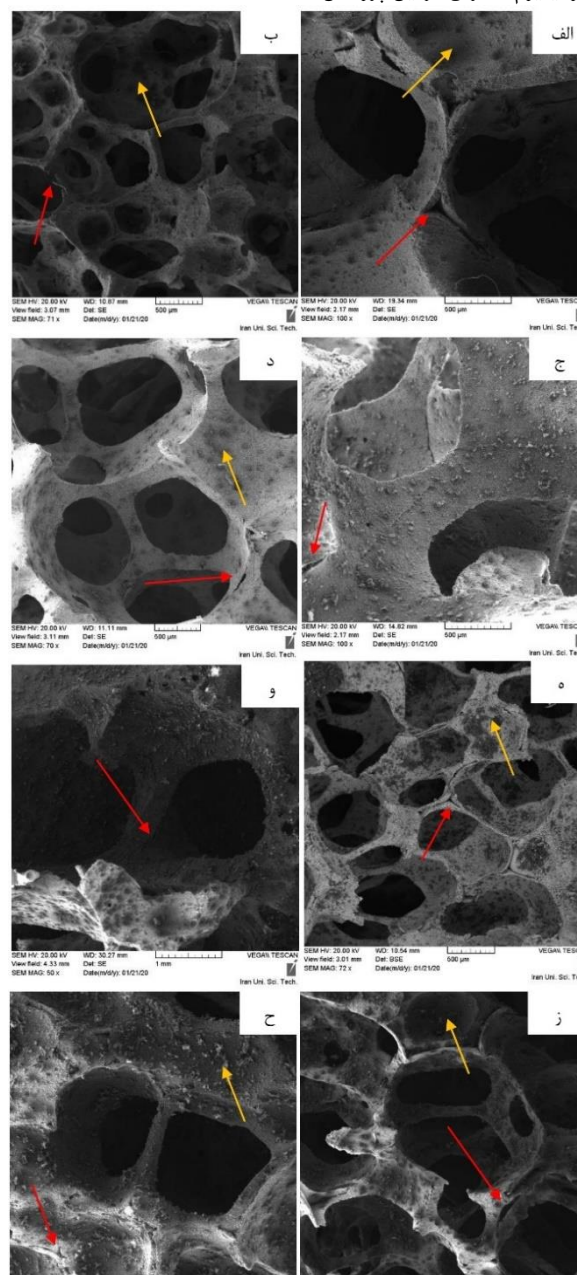
در ادامه، پس از تفجوشی فوم‌های پلی‌یورتان آغشته به دوغاب آلومینیوم، ریزساختار آن‌ها مورد مطالعه قرار گرفت (شکل ۳). شایان ذکر است، با کاهش عدد پی‌پی‌آی پیش‌ماده‌ی پلیمری، تعداد حفرات در هر اینچ مربع و تعداد دیواره‌ها کاهش و اندازه‌ی متوسط حفرات افزایش می‌یابد. لذا ظرفی‌پذیری حمل نمونه‌ی متخلخل با کاهش عدد پی‌پی‌آی افزایش می‌یابد، چنانچه امکان ساخت نمونه متخلخل بر پایه‌ی پیش‌ماده ۴۵ پی‌پی‌آی که یک مرتبه در دوغاب غوطه‌ور شده بود وجود نداشت. اما در صورت افزایش تعداد دفعات لایه‌نشانی دوغاب، دستیابی به ساختار متخلخل حتی در حضور پیش‌ماده ۴۵ پی‌پی‌آی امکان‌پذیر است. در شکل فوق دو سری پیکان قرمز رنگ و زرد رنگ نشان داده شده است. پیکان‌های قرمز رنگ در تصاویر فوق نشان‌دهنده جدایش بوده و حاکی از عدم اتصال در دیواره‌های سلول‌ها می‌باشند. در صورت عدم خروج دوغاب از حفرات پیش‌ماده، سلول بسته ایجاد می‌شود که با پیکان‌های زرد رنگ مشخص شده است. شایان ذکر است، جدایش‌های بزرگ به خصوص در نقاط اتصال سلول‌ها و در گوشه‌ها قابل مشاهده هستند، که مؤید تأثیر بیشتر انقباض سلول در کنج دیواره‌ها بعد از فرآیند تفجوشی می‌باشد. همچنین با افزایش عدد پی‌پی‌آی و کاهش اندازه‌ی سلول‌ها، اثر انقباض ناشی از تفجوشی کاهش یافته و در نتیجه تعداد و اندازه جدایش‌های گسترده کاهش می‌یابد. مطلب فوق در مقایسه بین تصاویر الف و ب از شکل ۳ مشهود می‌باشد. با اعمال گام دوم غوطه‌وری، سوراخ‌های ریز ناشی از انقباضی سلولی پس از تفجوشی، نسبت به یکبار غوطه‌وری کاهش می‌یابد (مقایسه تصاویر الف و د). اعمال گام سوم غوطه‌وری (تصاویر و، ز و ح)، همراه با بسته شدن برخی از سلول‌ها و در نتیجه، عدم توانایی خروج دوغاب اضافی از پیش‌ماده پلیمری است. همچنین با کاهش اندازه منافذ پیش‌ماده، احتمال بسته شدن سلول‌ها با افزایش دفعات غوطه‌وری بیشتر می‌گردد. مقایسه منافذ بسته شده در نمونه‌هایی بر پایه پیش‌ماده ۵۵ پی‌پی‌آی و ۶۵ گویای این مطلب است. باتوجه به یکسان بودن گرانی دوغاب و وزنه‌ی مورد استفاده جهت خروج دوغاب در دو پیش‌ماده، با کاهش حجم سلول احتمال خروج دوغاب سخت‌تر خواهد شد.

در ادامه، جهت بررسی نقش تعداد دفعات غوطه‌وری بر تغییرات ریزساختار نمونه‌ها، اندازه‌ی سلول‌ها، ضخامت دیواره‌ها و جرم نمونه‌ها اندازه‌گیری شده و همراه با چگالی نسبی ساختارهای متخلخل بر مبنای چگالی آلومینیوم بالک (gr.cm-3 7/2) در جدول ۳ ارائه شده است.

مطابق با داده‌های جدول ۳، با افزایش عدد پی‌پی‌آی، چگالی نسبی نمونه‌ها به صورت کلی افزایش می‌یابد. به‌گونه‌ای که در مقایسه بین دو نمونه که دو مرتبه در دوغاب غوطه‌ور گردیده است، چگالی نسبی با افزایش پی‌پی‌آی از ۴۵ به ۶۵ بیش از دو



شکل ۲) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و آنالیز ایکس‌آردی از پودر آلومینیوم مصرفی در این پژوهش



شکل ۳) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی در الف) PU55-88-A-G- (شکل ۱، ب) PU65-88-A-G-1، ج) PU45-88-A-G-2، د) PU55-88-A-G-2، ه) PU65-88-A-G-2، و) PU45-88-A-G-3، ز) PU55-88-A-G-3 و ح) PU65-88-A-G-3

جدول ۳) قطر متوسط سلول، اندازه دیواره، چگالی نسبی و جرم نمونه‌های متخلخل تولید شده در این پژوهش

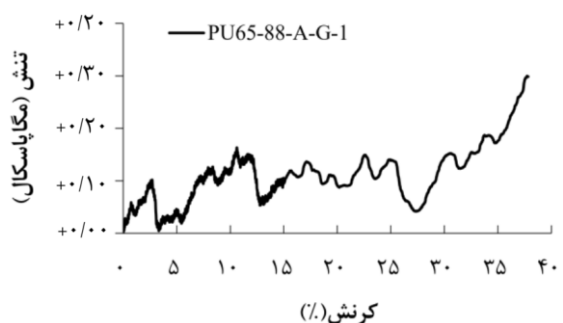
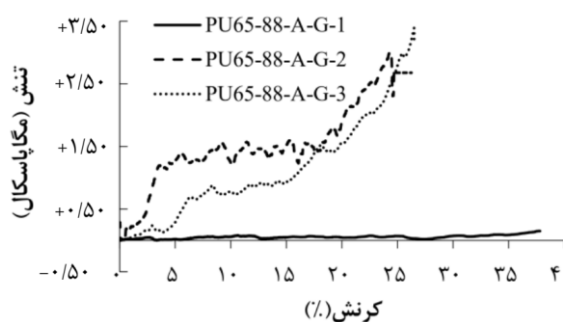
ردیف	کد نمونه	قطر متوسط سلول (μm)	اندازه دیواره (μm)	چگالی نسبی (%)	جرم (g)
۱	PU45-88-A-G-1	---	----	---	---
۲	PU45-88-A-G-2	۱۶۸/۱۰۱±۷۹/۹۹	۱۸۸/۲۷	-۰/۲۱	۱/۱۳
۳	PU45-88-A-G-3	۱۴۷/۸۸±۱۱/۳۴	۱۹۳/۴۰	-۰/۲۲	۱/۷۸
۴	PU55-88-A-G-1	۱۶۰/۱۰۱±۸۳/۰۴	۱۱۶/۵۴	-۰/۳۰	۴/۰۵
۵	PU55-88-A-G-2	۱۴۰/۶۵±۵۲/۲۶	۲۱۷/۸۰	-۰/۳۱	۵/۰۲
۶	PU55-88-A-G-3	۱۳۶/۴۱±۱۹/۵۸	۲۲۲	-۰/۳۲	۶/۰۴
۷	PU65-88-A-G-1	۱۵۰/۸۱±۶۲/۱۵	۱۱۸/۰۷	-۰/۴۶	۱۳/۶۶
۸	PU65-88-A-G-2	۱۳۰/۳۵±۹۵/۴۴	۲۰۸/۷۵	-۰/۴۶	۱۳/۶۶
۹	PU65-88-A-G-3	۹۸/۴۴±۷۵/۳۸	۲۱۷/۳۶	-۰/۴۷	۱۵/۲۲

برابر شده است. درحقیقت افزایش تعداد دیواره‌های نمونه‌های متخلخل همراه با افزایش چگالی نسبی است. علاوه بر این با کاهش اندازه‌ی متوسط حفرات در پیش‌ماده، خروج دوغاب از داخل منافذ پلی‌یورتان سخت‌تر شده و احتمال گیر افتادن دوغاب به‌خصوص در بخش مرکزی پیش‌ماده و در نتیجه بسته شدن تعدادی از سلول‌ها و کاهش تعداد سلول‌های راه‌بر وجود دارد. نتایج مشابهی نیز توسط وانگ و همکارانش^[21] گزارش شده است. مجموع موارد فوق می‌تواند سبب افزایش چگالی نسبی و جرم در نمونه‌هایی با مشخصه پیش‌ماده ۶۵ پی‌پی‌آی باشد. علاوه بر این با افزایش تعداد دفعات غوطه‌وری به‌ازای یک پیش‌ماده‌ی مشخص، اندازه‌ی متوسط سلول کاهش و ضخامت دیواره در نتیجه‌ی تجمع دوغاب و چسبندگی بیشتر آن بر روی لایه آلومینیومی خشک شده در مرحله غوطه‌وری قبلی افزایش می‌یابد. شایان ذکر است ترک‌هایی در تمامی نمونه‌ها قابل مشاهده است که با پیکان‌های قرمز نشان داده شده است. در شکل ۴، تصاویری از نمونه‌های PU65-88-A-G-1 و PU65-88-A-G-3 و ترک‌های موجود در آن‌ها با بزرگنمایی بالاتر نشان داده شده است.

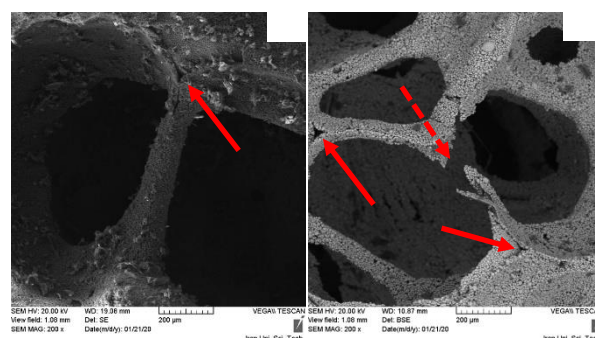
مطابق با شکل فوق، در نقاطی که تعداد دیواره‌ی بیشتری به‌هم می‌رسند، همانند کنج سه سلول (پیکان‌های ساده) احتمال مشاهده‌ی جدایش و ترک بیشتر است. از آنجا که فرآیند

تف‌جوشی همراه با انقباض است، در مناطقی که تعداد دیواره بیشتری به‌هم رسیده‌اند، میزان انقباض هر دیواره با دیواره‌های دیگر هم‌پوشانی نموده و سبب تمرکز تنش بیشتر و احتمال ایجاد ترک می‌گردد^[22]. اگر شدت تمرکز تنش از استحکام دیواره بیشتر باشد، ترک رشد نموده و جدایش دیواره رخ می‌دهد، همانند آنچه در شکل ۴ با پیکان خط‌چین نشان داده شده است. علاوه بر این در مقایسه بین دو نمونه با تعداد دفعات غوطه‌وری متفاوت (الف و ب) مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد دفعات غوطه‌وری، عمق جدایش و ترک تشکیل شده در گوشه‌ها کاهش می‌یابد. در حقیقت با افزایش ضخامت دیواره، سطح مقطع آن افزایش می‌یابد. بنابراین نیروی ناشی از تمرکز تنش ایجاد شده در اثر انقباض بر سطح مقطع دیواره کاهش یافته و لذا احتمال گسست پیوند، ایجاد ترک و اشاعه آن کمتر خواهد شد^[22]. شایان ذکر است، بدلیل غیر قابل حمل بودن ساختارهای متخلخل بر پایه پلی‌یورتان با مشخصه ۴۵ پی‌پی‌آی و ۵۵، امکان انجام آزمون فشار بر این دسته از فوم‌ها مقدور نبود. لذا رفتار فشاری نمونه‌هایی که با استفاده از پیش‌ماده‌ی پلیمری با مشخصه ۶۵ پی‌پی‌آی تولید شده‌اند، در شکل ۵ نشان داده شده است.

مطابق با نمودارهای شکل ۵، منحنی تنش-کرنش مواد متخلخل دارای سه ناحیه الاستیک، تنش ثابت همراه با کرنش متغیر (پایا) و شکست یا همان چگال شدن می‌باشد. شروع منطقه‌ی دوم همراه با عبور سطح تنش در گوشه‌ها و دیواره‌ها از میزان تسلیم ماده است. به علت ساختار غیریکنواخت (عدم خروج دوغاب از برخی از سلول‌ها، ضخامت غیریکنواخت دیواره‌ها و وجود جدایش و ترک بویژه در گوشه‌ها) در کرنش‌های نسبتاً کم



شکل ۵) منحنی تنش کرنش نمونه‌های PU65-88-A-G-1، PU65-88-A-G-2 و PU65-88-A-G-3

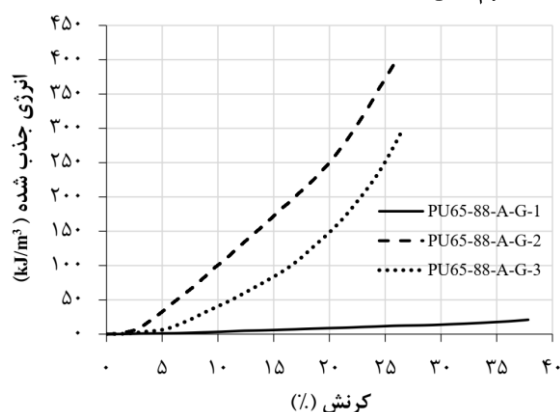


شکل ۴) تصویری از ریزساختار نمونه‌های، الف) PU65-88-A-G-1 و ب) PU65-88-A-G-3

مرحله‌ی دوم و سوم است، چنانچه بیشینه‌ی مقدار انرژی جذب شده مربوط به نمونه PU65-88-A-G-2 با بیشینه‌ی مقدار سطح تنش پایا است، به‌گونه‌ای که اختلاف بین بیشینه و کمینه‌ی انرژی جذب شده در نمونه‌ها تا پیش از شروع چگالش و پس از چگالش کامل به ترتیب بیش از ۱۳ و ۱۸ برابر می‌باشد. هرچند ارزیابی رفتار تنش-کرنش فشاری در مواد متخلخل دارای اهمیت است، اما میزان جذب انرژی این دسته از مواد از نکات کلیدی در قابلیت کاربرد آن‌ها می‌باشد. در شکل ۶ نمودار ظرفیت انرژی جذب شده بر حسب کرنش رسم شده است. این نمودار نشان دهنده‌ی اهمیت سطح تنش متوسط در جذب انرژی بوده، مضاف بر اینکه نشان دهنده‌ی قابلیت جذب انرژی در فوم‌ها حتی پس از مرحله چگالش است. علت رفتار بهینه نمونه PU65-88-A-G-2 در مقایسه با سایر نمونه‌ها، سطح تنش بیشتر منطقه فلات در نتیجه ریزساختار نسبتاً یکنواخت و نسبت ضخامت مناسب دیواره به طول گوشه‌ها است [16].

همچنین مطابق با شکل ۶، انرژی جذب شده در ناحیه الاستیک خطی نسبت به سایر مناطق بسیار کمتر است، در حالی که انرژی جذب در منطقه دوم بدلیل مکانیزم‌های متوالی خم شدن دیواره‌ها، تغییرشکل و فروپاشی مداوم سلول‌ها قابل توجه بوده و در ناحیه سوم بدلیل چگال شدن ساختار و افزایش شدید سطح تنش مشهود می‌باشد. نتایج مشابهی در مرجع [23] گزارش شده است.

مطابق با شکل ۶ و داده‌های جدول ۴ مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد دفعات غوطه‌وری در دوغاب، نسبت سهم انرژی جذب شده تا قبل از شروع، چگالش به کل انرژی جذب شده کاهش می‌یابد، چنانچه این نسبت در نمونه‌هایی با مشخصه ppi ۶۵ که یک مرتبه در دوغاب غوطه‌ور شده برابر با ۰/۷ بوده و با افزایش تعداد دفعات غوطه‌وری تا سه مرتبه به ۰/۳۱ کاهش می‌یابد. در حقیقت با افزایش تعداد دفعات غوطه‌وری در دوغاب، کاهش کرنش چگالش کنترل‌کننده نسبت سهم انرژی جذب شده تا منطقه دوم نسبت به حالت کلی (به عبارت دیگر کاهش طول منطقه دوم) می‌باشد.



شکل ۶) نمودار ظرفیت انرژی جذب شده بر حسب کرنش در نمونه‌های PU65-88-A-G-3 و PU65-88-A-G-2، PU65-88-A-G-1

در برخی از قسمت‌های فوم، تمرکز تنش از تنش تسلیم تجاوز می‌کند، که این مسئله باعث تغییرشکل زود هنگام ساختار متخلخل می‌گردد. افزایش نیرو بر روی فوم منجر به کمایش گوشه‌های سلول و در نواحی ضعیف‌تر سبب کمایش گوشه‌ها و دیواره‌های سلول می‌شود. باند تغییر شکل عمود بر جهت اعمال نیرو گسترش می‌یابد، که طی آن تغییر شکل پلاستیک سلول‌ها همراه با ورود به ناحیه مسطح در منحنی تنش-کرنش می‌باشد. ناحیه دوم در منحنی، بدلیل ساختار غیریکنواخت نمونه‌های متخلخل کاملاً مسطح نبوده و رفتار دندانه‌ای دارد و با از بین رفتن بیشتر سلول‌ها وارد ناحیه‌ی متراکم می‌شود. مطابق با داده‌های منحنی‌های شکل ۵، تعداد دفعات غوطه‌وری بر استحکام متوسط منطقه‌ی دوم تأثیر می‌گذارد. با افزایش نیرو، ساختار فشرده‌تر شده و با خمش کامل ستون‌ها، چگالش کامل صورت می‌گیرد. نقطه شروع چگالش کامل از تقاطع شیب مماس بر ناحیه دوم (فلات) و ناحیه سوم (چگال شدن) بدست می‌آید. در جدول ۴ داده‌های مستخرج از شکل ۵ ارائه شده است.

مطابق با داده‌های جدول فوق، با افزایش دفعات لایه‌نشانی دوغاب بر پیش‌ماده، کرنش متناظر با چگال شدن بشدت کاهش می‌یابد، که همراه با افزایش ضخامت دیواره‌ها و همچنین پرشدن برخی از سلول‌ها توسط آلومینیوم است. به‌گونه‌ای که با اعمال گام سوم غوطه‌وری، کرنش چگالش حدود ۵۰٪ نسبت به نمونه PU65-88-A-G-1 کاهش می‌یابد. در حقیقت فروریزش دیواره‌ها سبب سفت شدن موضعی ماده در هر لایه گردیده و مجدداً تغییرشکل پلاستیک با فروریزش دیواره‌ها در لایه‌های بعدی رخ می‌دهد. با افزایش ضخامت دیواره و کاهش حجم سلول، فضای لازم جهت فروریزش دیواره‌ها کاهش یافته و در نتیجه کرنش چگالش کم می‌شود. مضاف بر اینکه سلول‌های پر شده توسط دوغاب در مکانیزم فوق شرکت نکرده و سبب افت کرنش چگالش می‌شوند. اما رفتار فشاری متناظر با کرنش نبوده و بسیار حساس‌تر به عدم یکنواختی ریزساختار است. چنانچه در نمونه‌هایی که سه بار در دوغاب غوطه‌ور شده‌اند، حضور سلول‌های بسته سبب توزیع کرنش غیریکنواخت شده و کرنش تمایل به موضعی شدن در لایه‌های نازک دارد، لذا در سطح تنش کمتری احتمال پاره شدن و خم شدن دیواره‌ها وجود داشته که همراه با افت سطح تنش مسطح به میزان حدود ۳۲٪ در نمونه PU65-88-A-G-3 نسبت به PU65-88-A-G-2 می‌شود. درحقیقت اهمیت سطح تنش در کنترل میزان انرژی جذب شده تا پایان

جدول ۴) داده‌های مستخرج از منحنی‌های تنش-کرنش فشاری

نام اختصاری	تنش متوسط (MPa)	کرنش چگالش (%)	مقدار انرژی جذب شده (KJ/m ³) تا چگالش کامل
PU65-88-A-G-1	۰/۰۵	۳۱/۵	۲۰/۹۷
PU65-88-A-G-2	۱/۰۲	۱۸/۳	۴۰۵/۷۵
PU65-88-A-G-3	۰/۷	۱۵/۹	۲۹۶/۳۴

۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش فوق، فوم‌های آلومینیومی با اندازه‌ی حفرات متفاوت با استفاده از روش ریخته‌گری دوغابی و برپایه پیش‌ماده پلی‌یورتان با مشخصه‌های ۴۵ پی‌پی‌آی، ۵۵ و ۶۵ در بستری از گرافیت تولید شده است. علاوه بر تاثیر اندازه منافذ پیش‌ماده، نقش تعداد دفعات غوطه‌وری پیش‌ماده در دوغاب بر ریزساختار و خواص فشاری این دسته از ساختارهای متخلخل مورد بررسی قرار گرفته است. اهم نتایج بدست آمده در ذیل گزارش شده است.

۱- ساختار متخلخل ایجاد شده توسط پیش‌ماده با کمترین عدد تخلخل (۴۵ پی‌پی‌آی) بدلیل کاهش تعداد دیواره‌ها و ابعاد بزرگ سلول دارای قابلیت حمل بسیار کمی است، اما با افزایش دفعات غوطه‌وری پیش‌ماده فوق در دوغاب قابلیت حمل فوم تولیدی افزایش می‌یابد.

۲- با افزایش دفعات غوطه‌وری پیش‌ماده با مشخصه ۴۵ ppi، درحالی که ضخامت دیواره سلول ۳٪ افزایش یافته، قطر متوسط سلول ۱۲٪ کاهش می‌یابد. در نمونه‌هایی با پیش‌ماده‌هایی با مشخصه ۵۵ ppi و ۶۵ ppi نیز رفتاری مشابه دیده شده است. در نمونه ۵۵ ppi با افزایش تعداد دفعات غوطه‌وری از یک به سه مرتبه، ضخامت دیواره سلول ۹۲٪ و در نمونه ۶۵ ppi، ۸۳٪ افزایش می‌یابد. درحالی‌که مقدار کاهش قطر متوسط سلول در نمونه ۵۵ ppi و ۶۵ ppi به ترتیب ۱۵٪ و ۳۵٪ می‌باشد.

۳- احتمال ایجاد جدایش و ترک در ساختار متخلخل با افزایش تعداد نقاط اتصال دیواره‌ها افزایش می‌یابد، لذا در نقاط کنج جدایش‌های عمیق‌تری قابل مشاهده است، که ناشی از افزایش اثر انقباض‌های حاصل از تف‌جوشی است. همچنین با افزایش ضخامت دیواره‌ی سلول‌ها، ناشی از افزایش دفعات غوطه‌وری پیش‌ماده در دوغاب، مقاومت دیواره‌ها در برابر تنش‌های انقباضی افزایش یافته و عمق و طول جدایش‌ها کاهش می‌یابد.

۴- با افزایش دفعات لایه‌نشانی دوغاب بر پیش‌ماده، کرنش چگالش در نتیجه کاهش مکان لازم جهت خم شدن و کمانش دیواره‌ها حدود ۵۰٪ کاهش می‌یابد، به‌گونه‌ای که بیشینه مقدار کرنش فوق در نمونه PU65-88-A-G-1 قابل مشاهده است. لیکن بیشینه‌ی مقدار سطح تنش در نمونه‌ای با سه مرتبه غوطه‌وری در دوغاب مشاهده نگشت. مقدار تنش متوسط در حالت کلی بیش از ۱۹ برابر در مقایسه بین گام اول و دوم افزایش یافته است، این درحالیست که مقدار تنش متوسط در نمونه‌ی PU65-88-A-3 نسبت به نمونه‌ی PU65-88-A-2، حدود ۳۲٪ کاهش یافته است. به نظر می‌رسد مقدار سطح تنش پایا توسط یکنواختی ریزساختار کنترل می‌شود. به عبارت دیگر با افزایش تعداد دفعات غوطه‌وری در دوغاب، به علت بسته شدن یک‌سری از سلول‌ها، کرنش‌های موضعی در دیواره‌های نازک تجمع نموده و سبب پارگی و فروریزش دیواره‌ها در سطح تنش‌های پایین‌تر می‌شوند.

۵- درحالی‌که ظرفیت انرژی جذب شده در ساختارهای متخلخل توسط سطح تنش پایا کنترل می‌شود، نسبت انرژی جذب شده قبل از چگالش به سطح کلی زیر منحنی متاثر از مقدار کرنش چگالش است.

تشکر و قدردانی: از کلیه عزیزانی که در انجام این پژوهش نویسندگان را یاری نمودند، سپاسگزاری می‌شود.

تأییدیه اخلاقی: نویسندگان تأیید می‌کنند که تمامی نتایج ذکر شده در این مقاله صرفاً حاصل فعالیت‌های پژوهشی نویسندگان مقاله است و بر اساس نتایج پایان‌نامه کارشناسی ارشد با عنوان "تولید فوم آلومینیومی به روش ریخته‌گری دوغابی" نگاشته شده است.

تعارض منافع: پژوهش فوق هیچ گونه تعارض منافعی با سازمان‌ها و اشخاص ندارد.

سهم نویسندگان: فاطمه ربیعیان (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۴۰٪)؛ عسل حسینی منز (نویسنده دوم)، روش شناس/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث/پژوهشگر کمکی (۳۰٪)؛ سینا گلشن شرق (نویسنده سوم)، تحلیلگر آماری/نگارنده بحث/پژوهشگر کمکی (۳۰٪).

منابع مالی: کلیه هزینه‌ها توسط استاد راهنما تأمین شده است و پژوهش فاقد حامی مالی می‌باشد.

منابع

- 1- DIN 50134, Compression test of metallic cellular materials.
- 2- Davies G and Zhen S. Metallic foams: their production, properties and applications. Journal of Materials science. 1983;18(7):1899-1911.
- 3- Kim S and Lee CW. A review on manufacturing and application of open-cell metal foam. Procedia Materials Science. 2014;4:305-309.
- 4- Mane RS and Lokhande CD. Chemical deposition method for metal chalcogenide thin films. Materials Chemistry and physics. 2000;65(1):1-31.
- 5- Queheillalt DT, Hass DD, Sypek DJ, and Wadley H.N.G. Synthesis of open-cell metal foams by templated directed vapor deposition. Journal of Materials Research. 2001;16(4):1028-1036.
- 6- Banhart J. Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams. Progress in materials science. 2001; 46(6):559-632.
- 7- Chen A, Li M, Xu J, Lou Ch, MinWu J, Cheng L, ShengShi Y and HuiLi Ch. High-porosity mullite ceramic foams prepared by selective laser sintering using fly ash hollow spheres as raw materials. Journal of the European Ceramic Society. 2018;38(13):454554-53.
- 8- Sánchez-Martínez A, Cruz A, González-Nava M and Suárez M.A. Main process parameters for manufacturing open-cell Zn-22Al-2Cu foams by the centrifugal infiltration route and mechanical properties. Materials & Design. 2016;108:494-500.
- 9- Ho NS, Li P, Raghavan S, Li T. The effect of slurry composition on the microstructure and mechanical

properties of open-cell Inconel foams manufactured by the slurry coating technique. *Materials Science and Engineering: A*. 2017;687:123-30.

10- Xie B, Fan Y.Z, Mu T.Z and Deng B. Fabrication and energy absorption properties of titanium foam with CaCl₂ as a space holder. *Materials Science and Engineering: A*. 2017;708:419-423.

11- Wang N, Maire E, Chen X, Adrien J, Li Y, Amani Y, Hu L, et al. Compressive performance and deformation mechanism of the dynamic gas injection aluminum foams. *Materials Characterization*. 2019;147:11-20.

12- Manonukul A, Tange M, Srikudvien P, Denmud N and Wattanapornphan P. Rheological properties of commercially pure titanium slurry for metallic foam production using replica impregnation method. *Powder technology*. 2014;266:129-134.

13- Utsunomiya H and Matsumoto R. Deformation processes of porous metals and metallic foams. *Procedia Materials Science*. 2014;4:245-249.

14- Mukai T, Kanahashi H, Higashi K and Miyoshi T. Experimental study of energy absorption in a close-celled aluminum foam under dynamic loading. *Scripta Materialia*. 1999;40(8).

15- Divandari M, VahidGolpayegani A, Shahverdi HR. Metal foams. 1389;2:15-58.[Persian]

16 -Xia XC, Chen XW, Zhang Z, Chen X, Zhao WM, Liao B, Hur B. Effects of porosity and pore size on the compressive properties of closed-cell Mg alloy foam. *Journal of Magnesium and Alloys*. 2013;1(4):330-5.

17- Zaman E and Keleş Ö. Open cell aluminum foams produced by polymer impregnation method. *Acta Physica Polonica A*. 2014;125(2):445-448.

18- Jana S.K and Bhaskarwar A.N. Gas absorption accompanied by chemical reaction in a system of three-phase slurry-foam reactors in series. *Chemical Engineering Research and Design*. 2011;89(6):793-810.

19- Zhang Y, You L, Huang Z, Gao Y and Yan J. Experiment development of foam slurry materials. *Procedia Engineering*. 2012;45:768-773.

20- Tange M, Manonukul A and Srikudvien P. The effects of organic template and thickening agent on structure and mechanical properties of titanium foam fabricated by replica impregnation method. *Materials Science and Engineering: A*. 2015;641:54-61.

21- Wang Ch, Chen H, Zhu X, Xiao Zh, Zhang K and Zhang X. An improved polymeric sponge replication method for biomedical porous titanium scaffolds. *Materials Science and Engineering: C*. 2017;70:1192-1199.

22- Kumar R, Jain H, Sriram S, Chaudhary A, Khare A, A.N.Ch V and Mondal D.P. Lightweight open cell aluminum foam for superior mechanical and electromagnetic interference shielding properties. *Materials Chemistry and Physics*. 2020;240:122274.

23- Soni B and Biswas S. Development of Al foams by a low-cost salt replication method for industrial applications. *Materials Today: Proceedings*. 2015;2(4-5):1886-1891.