



تولید فوم آلومینیوم با سلول های باز و بررسی پارامترهای موثر بر روی استحکام فشاری آن با استفاده از روش تاگوچی

عاطفه نبوی^۱، جلیل وحدتی خاکی^۲

چکیده

در این تحقیق از فرایند فشردن پودر اطراف فیلر که یکی از روش های تولید فوم های فلزی در حالت جامد است، برای تولید فوم های آلومینیومی استفاده شده است. فرایند تولید شامل مراحل مخلوط کردن، فشردن، سینتر کردن و انحلال می شود. در این تحقیق برای بهینه کردن پارامترهای فرایند تولید فوم فلزی و بدست آوردن بیشترین استحکام فشاری برای فوم آلومینیومی تولید شده از روش تاگوچی استفاده شد. پارامترهایی از فرایند تولید که بر روی استحکام فشاری فوم های فلزی تاثیر می گذارند و مورد بررسی قرار گرفته اند عبارتند از: درصد وزنی نمک در نمونه، دما و زمان سینتر شدن، فشار پرس تولید فوم و اندازه ذرات آلومینیوم. شرایط بهینه تولید فوم آلومینیومی با فرایند فشردن پودر اطراف فیلر با استفاده از روش تاگوچی تعیین شد. نتایج بدست آمده نشان داد که درصد وزنی نمک در فوم های آلومینیومی تولید شده بیشترین تاثیر را بر روی افزایش استحکام فشاری فوم داشته (74.07%) و پس از آن فشار پرس بیشترین اثر را بر روی استحکام فشاری فوم می گذارد (10.57%). با استفاده از این روش، می توان فوم آلومینیومی با میزان 82% تخلخل باز با مرفولوژی و توزیع یکنواخت و دانسیته 0.49 g/cm³ تولید کرد.

واژه های کلیدی: فوم آلومینیوم، نمک، استحکام فشاری، روش تاگوچی

^۱ کارشناس ارشد مهندسی متالورژی و مواد دانشگاه فردوسی

^۲ استاد گروه مهندسی متالورژی و مواد دانشگاه فردوسی

مقدمه

در سال های اخیر فوم های فلزی توجه زیادی را به خود جلب کرده اند. علت این امر دانسته بسیار کم آنها، استحکام و سفتی ویژه بالای آنها و خواص عملکردی منحصر بفرد آنها مانند: قابلیت جذب انرژی ضربه ای، توانایی جذب انرژی صوتی، مقاومت در برابر اشتعال و.. است [1-3]. در حقیقت می توان گفت که فوم های فلزی با خواص مکانیکی و فیزیکی عالی ای که دارند، محدوده کاربرد مواد سلولی را گسترش داده اند. از جمله این موارد پایداری حرارتی بالا و قابلیت بازیافت آنها در مقایسه با فوم های پلیمری است [4,5].

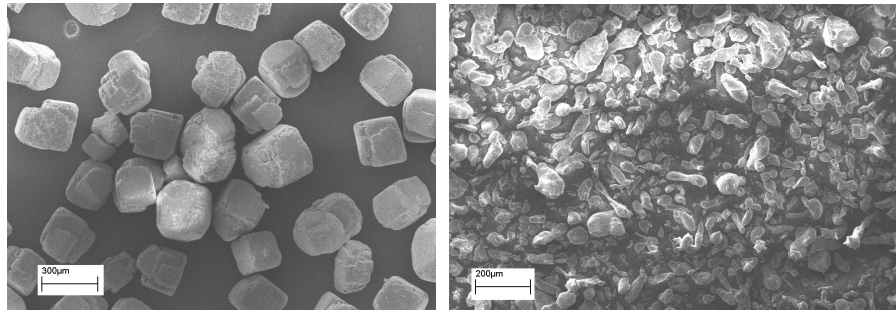
این خصوصیات، این امکان را برای فوم های فلزی به خصوص فوم های آلومینیومی بوجود می آورد که در کاربردهای زیادی مانند: خالص سازی و فیلتراسیون، مبدل های حرارتی، کاتالیزورها، بیومتریال و هم چنین در صنایع خودرو سازی، ساختمان سازی و هوا و فضا مورد استفاده قرار گیرند [2,3]. روش های زیادی برای تولید فوم های فلزی گسترش یافته است، که می توان آنها را در چهار دسته اصلی طبقه بندی کرد: فرایندهای حالت مایع، فرایندهای حالت جامد، رسوب دهی فاز بخار و رسوب دهی الکتریکی [1].

در هر صورت فوم های آلومینیومی که با استفاده از این روش ها تولید می شوند به دلیل هزینه بالای تولید بسیار گران هستند و یا به دلیل عدم توانایی کنترل ساختار حفره ها و تخلخل ها کیفیت بالایی ندارند [6,7]. در نتیجه کاربرد تجاری قطعات ساخته شده از فوم های آلومینیومی محدود است و گسترش زیادی نداشته است. با توجه به تقاضای زیادی که برای فوم های آلومینیوم با کیفیت بالا و قیمت مناسب وجود دارد، نیاز به گسترش روش های تولیدی که توانایی تولید فوم های آلومینیوم با هزینه مناسب و کیفیت بالا را داشته باشند، احساس می شود [6].

در این تحقیق از روشی بر مبنای متالورژی پودر برای تولید فوم های آلومینیوم با سلول های باز که به نام فشردن پودر اطراف فیلر شناخته می شود، استفاده شده است. در این تحقیق از نمک (NaCl) به عنوان فیلر استفاده شده است. علت استفاده از نمک هزینه پایین، خنثی بودن آن از نظر شیمیایی در تماس با آلومینیوم و به راحتی حل شدن آن در آب است. این فرایند تولید نه تنها از نظر اقتصادی مقرون به صرفه است بلکه قابلیت تولید فوم های آلومینیوم با شکل نهایی مورد نظر همراه با کنترل مرفولوژی، اندازه و نحوه توزیع حفرات را داراست [8,9]. با توجه به کاربردی بودن و پتانسیل بالای این روش تولید، اطلاعات زیادی در مورد آن در دسترس نیست. به همین دلیل هدف از این تحقیق بررسی این روش تولید فوم های آلومینیومی و بهینه سازی پارامترهای فرایند به منظور افزایش استحکام فشاری فوم تولیدی با استفاده از روش تاگوچی است.

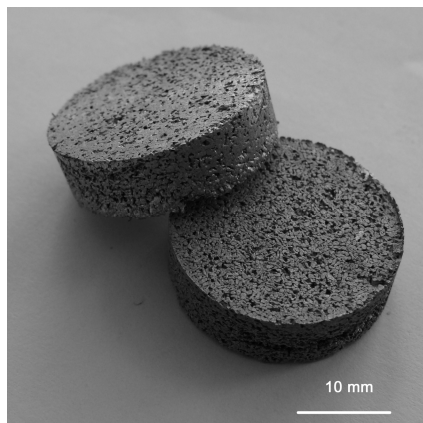
مواد و روش تحقیق

در این تحقیق از پودر آلومینیوم تولید شرکت متالورژی پودر خراسان با خلوص 99.5% و با دو اندازه ذرات متفاوت کوچکتر از 100 میکرون و بین 400 و 500 میکرون - که به اختصار در جداول بصورت 100 و 500 آورده شده اند - استفاده شد. علاوه بر این از نمک تجاری با میانگین اندازه ذرات کوچکتر از 75 میکرون نیز استفاده شد. مرفولوژی پودر آلومینیوم و نمک مورد استفاده در شکل 1 آورده شده است.



شکل 1. تصاویر SEM از (الف) پودر آلومینیوم، (ب) ذرات نمک

فرایند تولید شامل مخلوط کردن مکانیکی دو پودر نمک و آلومینیوم با نسبت وزنی معین، فشردن مخلوط پودری بدست آمده، سینتر کردن قطعه پیش شکل ساخته شده و در نهایت انحلال نمک است. در ابتدا نمک در 120°C به مدت 45 دقیقه حرارت دید تا رطوبت آن خارج شود. سپس به منظور ایجاد ساختاری یکنواخت و همگن و توزیع مناسب حفرات در فوم های فلزی تولید شده، دو پودر آلومینیوم و نمک با درصد های وزنی معین در درون آسیا ماهواره ای به مدت 15 دقیقه با نسبت گلوله به پودر 1:1 با سرعت چرخش 150 rpm مخلوط شدند. مخلوط پودری حاصل با استفاده از دستگاه Zwick/Z250 به شکل نمونه های استوانه ای شکل به منظور انجام تست فشار بر روی آنها، فشرده شدند. در همه حالات سرعت جابجایی فک ثابت و برابر 5 mm/min در نظر گرفته شد. برای سینتر کردن نمونه های پرس شده، نمونه ها در درون فویل آلومینیومی و در مخلوطی از پودر گرافیت و زغال پیچیده شدند تا از اکسید شدن آنها در حین سینتر شدن جلوگیری شود. سپس نمونه ها در درون کوره قرار داده شدند و در دماهای مورد نظر به مدت معین حرارت دیدند. پس از سینتر شدن نمونه و خارج کردن آنها از کوره، نمونه ها تا دمای محیط سرد شدند. پس از وزن کردن نمونه ها در درون آب با دمای 80°C قرار داده شدند تا ذرات نمک حبس شده در درون آنها حل شود. بعد از خارج کردن نمونه ها از درون آب و خشک کردن آنها، به منظور محاسبه دانسیته فوم های تولید شده و هم چنین محاسبه درصد تخلخل موجود در آنها، جرم و حجم فوم های تولیدی اندازه گیری شد. وزن آنها با استفاده از ترازو با دقت 0.01 گرم و ارتفاع و سطح مقطع آنها با کولیس با دقت 0.05 میلیمتر اندازه گیری شد. نمونه ای از فوم های تولید شده در این تحقیق در شکل 2 آورده شده است.



شکل 2. نمونه ای از فوم های تولید شده در این تحقیق

به منظور انجام بررسی های ریز ساختمانی و بررسی نحوه توزیع حفرات در فوم های آلومینیومی تولید شده تصاویر SEM از فوم های تولید شده با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) LEO 1450vp تهیه شد. در نمونه های استوانه ای تهیه شده جهت انجام تست فشار نسبت طول به قطر بیشتر از 1.5 و اندازه نمونه حداقل هفت برابر بزرگترین حفره درون فوم بود [3]. به منظور تعیین استحکام فشاری فوم های فلزی ساخته شده بر روی این نمونه ها تست فشار انجام شد. اندازه نمونه ها یکسان در نظر گرفته شد تا از اثر اندازه نمونه بر استحکام فوم جلوگیری شود [7]. برای انجام تست فشار بر روی نمونه ها از دستگاه Zwick/Z250 استفاده شد. حداکثر ظرفیت دستگاه 250 کیلو تن بوده و سرعت جابجایی فک ثابت در 2 mm/min تنظیم شد.

پارامترهایی از فرایند تولید که بر روی استحکام فشاری فوم های فلزی تاثیر می گذارند و مورد بررسی قرار گرفته اند عبارتند از درصد وزنی نمک که در محدوده بین 25 تا 70 درصد متغیر گرفته شد. دما و زمان سینتر شدن که به ترتیب در محدوده بین 500-650 درجه سانتیگراد و 30-180 دقیقه، اندازه ذرات آلومینیوم که در دو رنج متفاوت کوچکتر از 100 میکرون و بین 400 تا 500 میکرون - که به اختصار در جداول بصورت 100 و 500 آورده شده اند - در نظر گرفته شدند. علاوه بر این فشار پرس اولیه برای تولید فوم بین 100 تا 400 مگا پاسکال متغیر بود. در جدول 1 پارامترها و مقادیر در نظر گرفته شده برای آنها آورده شده اند.

جدول 1. پارامترهای کنترل کننده و مقادیر در نظر گرفته شده برای آنها در بهینه سازی استحکام فشاری فوم

مقادیر				پارامترها	
4	3	2	1		
70	55	40	25	(A)	درصد وزنی نمک
650	600	550	500	(B)	دمای سینتر شدن
180	120	60	30	(C)	زمان سینتر شدن
400	300	200	100	(D)	فشار پرس
500	100	500	100	(E)	اندازه ذرات آلومینیوم

روش تاگوجی به منظور تعیین شرایط بهینه و انتخاب پارامتری که بیشترین تاثیر را بر روی استحکام فشاری فوم های تولید شده دارد، بکار گرفته شد. استفاده از روش تاگوجی امکان درک کامل تاثیر جداگانه و هم زمان پارامترهای مختلف بر روی یک خاصیت را با کمترین تعداد آزمایش فراهم می کند. در این روش از یک نسبت کلی سیگنال به نویز (S/N) برای تعیین میزان تغییرات استفاده می شود. نسبت S/N بسته به نوع خاصیت در نظر گرفته شده سه نوع متفاوت دارد: "میانه بهتر است (نوع N)، "بزرگتر بهتر است" (نوع B) و "کوچکتر بهتر است" (نوع S). هنگامی که بزرگتر بودن خاصیت مطلوب است از رابطه زیر استفاده می شود [10,11]:

$$S/N_N = -10 \text{Log}_{10} \left(\frac{1}{n} \sum \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (1)$$

که در این رابطه y_i خاصیت در نظر گرفته شده، و n تعداد آزمایشات است. در این جا چون خاصیت استحکام فشاری فوم مد نظر است و بالاتر بودن این خاصیت مطلوب است، برای تعیین نسبت S/N از رابطه (1) استفاده می شود.

يافته ها

در جدول 2 مقادير استحکام فشاری و نسبت S/N برای خاصیت استحکام فشاری که با استفاده از رابطه (1) محاسبه شده اند، آورده شده است. هم چنین مقدار متوسط نسبت S/N برای مقادير متفاوت از هر پارامتر در جدول 3 آورده شده است.

جدول 2. مقادير اندازه گیری شده تجربي و نسبت S/N برای استحکام فشاری فوم های توليد شده (آریش اورنوگنال L16 تاگوچی)

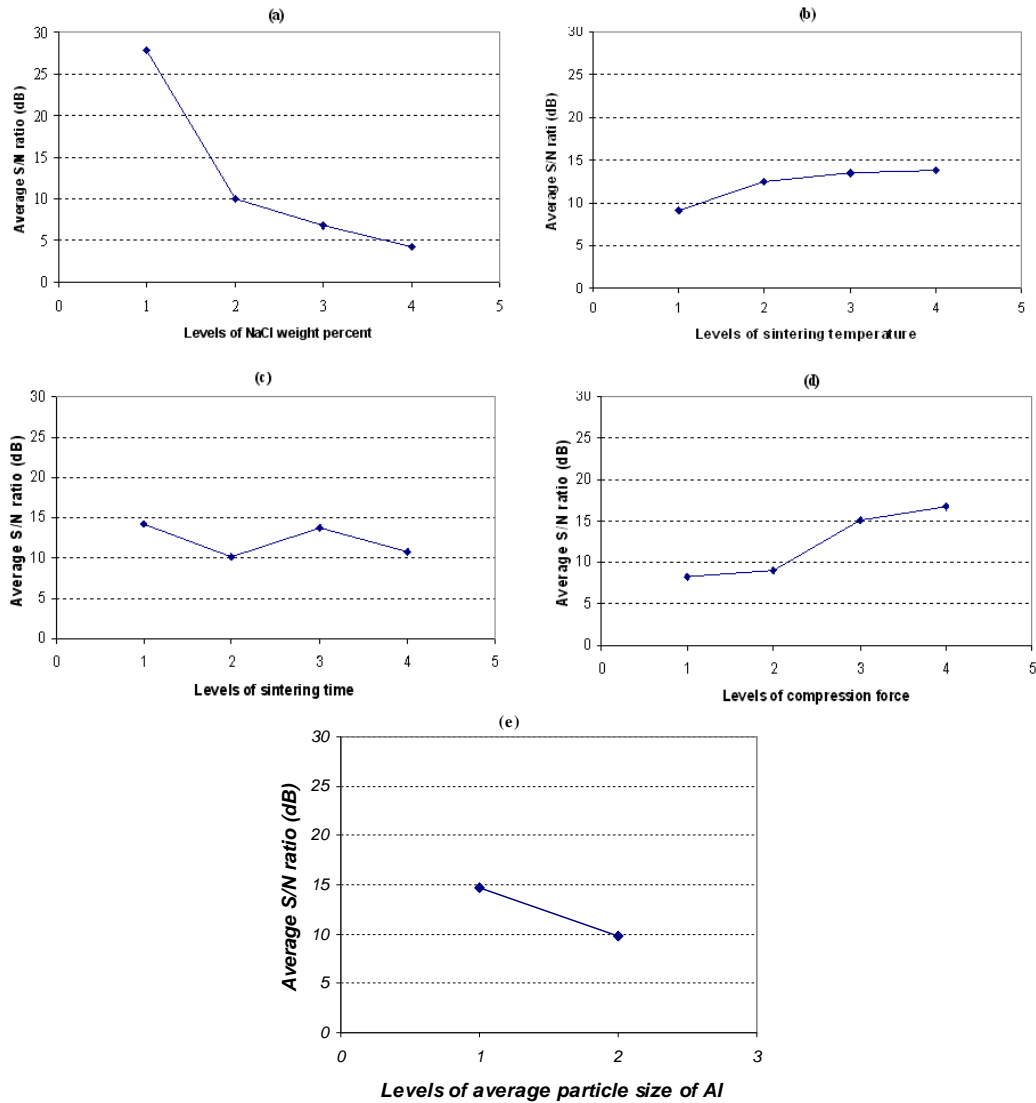
شماره آزمایش	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	استحکام فشاری (MPa)	نسبت S/N
1	1	1	1	1	1	15.94	24.05
1	1	2	2	2	2	9.30	19.37
1	1	3	3	3	3	72.82	37.25
1	1	4	4	4	4	35.41	30.98
2	2	1	2	3	4	2.01	6.06
2	2	2	1	4	3	10.52	20.44
2	2	3	2	1	2	1.33	2.48
2	2	4	3	2	1	3.56	11.03
3	3	1	3	4	2	2.04	6.19
3	3	2	4	3	1	3.09	9.80
3	3	3	1	2	4	1.84	5.30
3	3	4	2	1	3	1.99	5.98
4	4	1	4	2	3	1.01	0.09
4	4	2	3	1	4	1.05	0.42
4	4	3	2	4	1	2.91	9.28
4	4	4	1	3	2	2.30	7.23

جدول 3. مقدار متوسط نسبت S/N برای مقادير مختلف پارامترهای در نظر گرفته شده

متوسط نسبت S/N				پارامترها
مقدار 4	مقدار 3	مقدار 2	مقدار 1	
4.26	6.82	10.00	27.91	(A)
13.81	13.57	12.51	9.10	(B)
10.84	13.72	10.17	14.26	(C)
16.72	15.09	8.95	8.23	(D)
		9.76	14.74	(E)

بحث

همان طور که در جدول 3 آورده شده است، کمترین و بیشترین مقادير مربوط به پارامتر (A) می باشد. بنابراین این موضوع روشن می شود که درصد وزنی نمک موثرترین پارامتر در افزایش استحکام فشاری فوم است و بیشترین تاثیر را بر روی استحکام فشاری دارد. در شکل 3 گراف های رسم شده با استفاده از مقدار متوسط نسبت S/N برای استحکام فشاری فوم آورده شده است. با توجه به شکل 3 ذکر این نکته ضروری است که مقادير بهینه برای هر پارامتر در محدوده در نظر گرفته شده برای آن A1، B4، C1، D4 و E1 هستند. بر این اساس شرایط بهینه تولید برای افزایش استحکام فشاری میزان درصد وزنی نمک 25%، دمای سینتر شدن 650 °C، زمان سینتر شدن 30 دقیقه، فشار پرس 400 MPa و اندازه ذرات آلومینیوم 100 میکرون است.



شکل 3. مقدار متوسط نسبت S/N برای استحکام فشاری فوم (a) درصد وزنی نمک، (b) دمای سینتر شدن، (c) زمان سینتر شدن، (d) فشار پرس و (e) اندازه ذرات آلومینیوم

همان طور که انتظار می رود و مطابق با تحقیقات [6] با افزایش درصد نمک، به دلیل کاهش دانسیته (افزایش درصد تخلخل) فوم، استحکام فشاری فوم کاهش می یابد. تاثیر این پارامتر بر روی استحکام فشاری فوم کاملاً مشخص بود و دلیل انتخاب این پارامتر به عنوان یکی از پارامترهای تاثیر گذار بر روی استحکام فوم، تعیین میزان تاثیر آن بر روی استحکام فشاری فوم به کمک تحلیل ANOVA بود.

همان طور که مشاهده می شود دما و زمان سینتر شدن در محدوده انتخاب شده تاثیر چندانی بر روی استحکام فوم نداشته است. با افزایش دما به علت سینتر شدن بهتر ذرات آلومینیوم فشرده شده در اطراف نمک و ذوب سطحی و پیوستن آنها به یکدیگر، دماهای بالاتر اتصال قوی تر و شبکه های فلزی مستحکم تری را ایجاد نموده و باعث افزایش استحکام فشاری فوم می شوند.

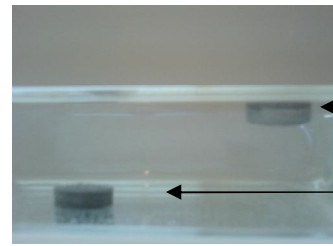
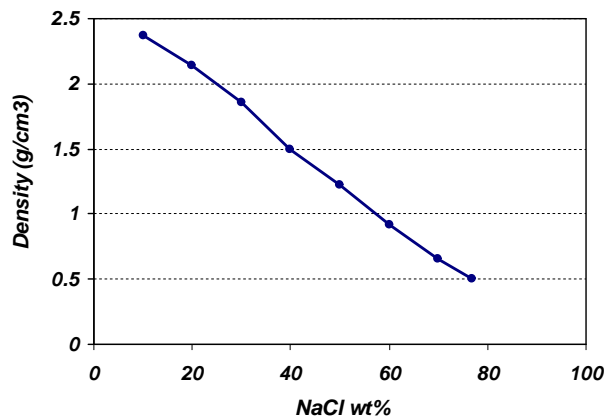
با افزایش فشار پرس، دانسیته خام قطعه تولیدی افزایش یافته و همان طور که گفته شد افزایش دانسیته باعث افزایش استحکام فشاری فوم می شود. با ریز تر شدن ذرات پودر آلومینیوم، نسبت سطح به حجم ذرات افزایش یافته و هم چنین

کوچکتر بودن ذرات آلومینیوم باعث می شود تا طی فرایند مخلوط شدن ذرات آلومینیوم به خوبی ذرات نمک را در بر گرفته و شبکه ای پیوسته تشکیل دهند، این دو عامل باعث سینتر شدن و اتصال بهتر ذرات آلومینیوم به یکدیگر می شود. در ادامه از آنالیز واریانس به منظور بررسی این مسئله است که هر کدام از پارامترهای فرایند به چه میزان استحکام فشاری فوم های آلومینیومی را تحت تاثیر قرار می دهند استفاده شده است و نتایج حاصل از آن در جدول 4 آورده شده است. همان طور که دیده می شود، درصد وزنی نمک در فوم های آلومینیومی تولید شده بیشترین تاثیر را بر روی افزایش استحکام فشاری فوم دارد (74.07%) و پس از آن فشار پرس بیشترین اثر را بر روی استحکام فشاری فوم می گذارد (10.57%). همان طور که در جدول 4 مشاهده می شود، دما و زمان سینتر شدن تاثیر زیادی بر روی استحکام فشاری فوم نداشته و بنابراین تغییر دما و زمان در رنج دمایی (500-650 °C) و زمانی (30-180 min) در نظر گرفته شده، تاثیر چندانی بر روی استحکام فشاری فوم تولیدی نخواهد داشت. اندازه ذرات آلومینیوم پس از درصد نمک و فشار پرس بیشترین اثر را بر روی استحکام فشاری فوم دارد (4.93%).

جدول 4. تحلیل ANOVA برای نسبت S/N استحکام فشاری

پارامترها	DF	SS	MS	F	ρ (%)
درصد وزنی نمک	3	1381.06	460.35	49.24	74.07
دمای سینتر شدن	3	56.34	18.78	2.01	1.55
زمان سینتر شدن	3	50.03	16.68	1.78	1.20
فشار پرس	3	221.13	73.71	7.88	10.57
اندازه ذرات آلومینیوم	1	99.41	99.41	10.63	4.93
خطا	2	18.70	9.349		7.68

با استفاده از شرایط بهینه بدست آمده توسط روش تاگوچی فوم های آلومینیومی با تغییر درصد نمک درون فوم از 10 تا 77 درصد، با میزان حداقل 19% (دانسیته 2.37 g/cm³) و حداکثر 82% (دانسیته 0.49 g/cm³) تخلخل تولید شدند. بنابراین با استفاده از این روش تولید فوم های فلزی می توان ماکسیمم به 82 درصد تخلخل در فوم های تولید شده دست یافت. نمودار تغییرات دانسیته فوم های تولیدی بر حسب میزان نمک بکار گرفته شده در تولید در شکل 4- الف آورده شده است. با توجه به نمودار شکل 4- الف، در فوم با درصد نمک حدود 56% دانسیته فوم 1 g/cm³ خواهد بود. بنابراین و همان طور که در شکل 4- ب مشاهده می شود، فوم های با درصد نمک بالاتر از 56% بر روی آب شناور مانده در حالیکه فوم های با درصد وزنی نمک پایین تر درون آب فرو می روند.

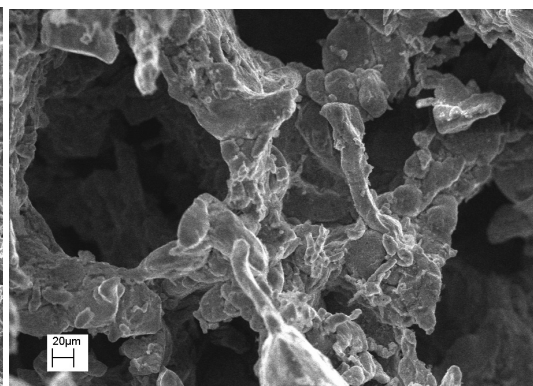
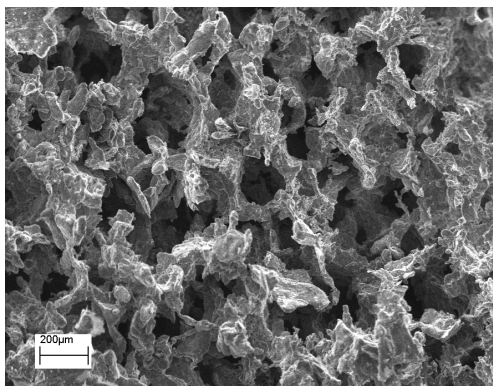


(الف)

(ب)

شکل 4. (الف) تغییرات دانسیته فوم تولیدی با تغییر درصد نمک، (ب) قرار گرفتن فوم های آلومینیومی با دانسیته کمتر از یک بر روی آب

در شکل 5 تصویر SEM ساختار فوم تولید شده تحت شرایط بهینه بدست آمده، با 60٪ وزنی نمک آورده شده است. همان طور که مشاهده می شود فوم ساختاری همگن با حفرات باز دارد.

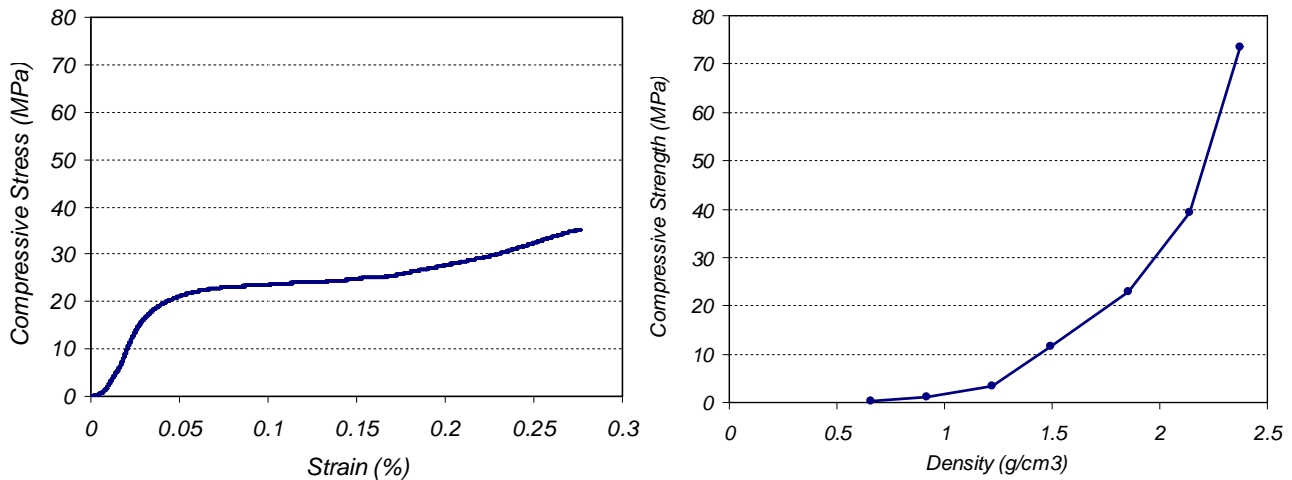


(الف)

(ب)

شکل 5. (الف) و (ب) تصویر SEM ساختار فوم تولید شده با 60٪ وزنی نمک در دو بزرگ نمایی متفاوت

نمودار تنش - کرنش فشاری فوم با 30 درصد وزنی نمک در شکل 6- الف آورده شده است. همان طور که مشاهده می شود در این نمودار مشابه رفتار فشاری سایر فوم های فلزی سه ناحیه قابل تفکیک وجود دارد. در ابتدا ناحیه تغییر فرم الاستیک است، پس از آن در یک تنش نسبتاً ثابت کرنش افزایش یافته تا در نهایت پس از یک میزان معین کرنش، با تخریب دیواره های فوم تنش افزایش یافته و وارد ناحیه تراکم پذیری منحنی می شویم [2]. هم چنین تغییر استحکام فشاری فوم های تولید شده با استفاده از شرایط بهینه، با تغییر دانسیته فوم در شکل 6- ب آورده شده است. همان طور که مشاهده می شود با افزایش دانسیته فوم، استحکام فشاری فوم افزایش می یابد. هم چنین در مقالات ذکر شده است که استحکام فشاری فوم های آلومینیومی با دانسیته فوم رابطه ای غیر خطی دارد، که نتیجه بدست آمده از این تحقیق نیز این مطلب را تأیید می کند [12,13].



شکل 6. الف) منحنی تنش - کرنش فشاری برای فوم آلومینیوم تولید شده با 30 درصد وزنی نمک، ب) تغییر استحکام فشاری با تغییر دانسیته برای فوم های آلومینیومی تولید شده

نتیجه گیری

1. درصد وزنی نمک در فوم های آلومینیومی تولید شده بیشترین تاثیر را بر روی افزایش استحکام فشاری فوم دارد (74.07%) و پس از آن فشار پرس بیشترین اثر را بر روی استحکام فشاری فوم می گذارد (10.57%).
2. اندازه ذرات آلومینیوم پس از درصد نمک و فشار پرس بیشترین اثر را بر روی استحکام فشاری فوم دارد (4.93%).
3. با استفاده از شرایط بهینه بدست آمده توسط روش تاگوچی، فوم های آلومینیومی با تغییر درصد نمک درون فوم از 10 تا 77 درصد وزنی، با میزان حداقل 19% (دانسیته 2.37 g/cm^3) و حداکثر 82% (دانسیته 0.49 g/cm^3) تخلخل تولید شدند. بنابراین با استفاده از این روش تولید فوم های فلزی می توان ماکسیمم به 82 درصد تخلخل در فوم های تولید شده دست یافت. فوم با درصد نمک حدود 56% دانسیته ای برابر با 1 g/cm^3 خواهد داشت. بنابراین فوم های با درصد نمک بالاتر از 56% بر روی آب شناور مانده در حالیکه فوم های با درصد وزنی نمک پایین تر درون آب فرو می روند.
4. با استفاده از این روش، می توان فوم آلومینیومی با حداکثر میزان 82% تخلخل باز با مرفولوژی و توزیع یکنواخت حفرات در ساختار و دانسیته 0.49 g/cm^3 تولید گردید.
5. با افزایش دانسیته فوم های تولید شده، استحکام فشاری فوم افزایش می یابد و استحکام فشاری با دانسیته فوم رابطه ای غیر خطی دارد.
6. در منحنی تنش - کرنش فشاری فوم های تولید شده سه ناحیه قابل تشخیص است: در ابتدا ناحیه تغییر فرم الاستیک است، پس از آن در یک تنش نسبتاً ثابت کرنش افزایش یافته تا در نهایت پس از یک میزان معین کرنش، با تخریب دیواره های فوم تنش افزایش یافته و ناحیه تراکم پذیری منحنی آغاز می شود که در آن دیواره سلول ها بطور گسترده تخریب می شود.

مراجع

- [1] M.F. Ashby, A.G. Evans, N.A. Fleck, L.J. Gibson, J.W. Hutchinson and H.N.G. Wadley, Metal Foams: A Design Guide, Butterworth Heinemann, 2000.
- [2] H.P. Degischer, B.Kriszt, Handbook of Cellular Metals, Production, Processing, Applications, ISBNs: 3-527-30339-1 (Hardback); 3-527-60055-8 (Electronic), 2002.
- [3] John Banhart, " Manufacture, Characterization and application of cellular metals and metal foam", progress in Material Science, Volume 46, Issue 6, pp. 559-585, 2001.
- [4] Lorenzo Peroni, Massimiliano Avalle, Marco Peroni, "The mechanical behaviour of aluminium foam structures in different loading conditions", International Journal of Impact Engineering, Article in press
- [5] Chin-Jye Yu, Harald H. Eifert, John Banhart, Joachim Baumeister, "Metal foaming by a powder metallurgy method: Production, properties and applications", springer-verlag 1998, 181-188
- [6] Y.Y. Zhao, D.X. Sun, "A NOVEL SINTERING-DISSOLUTION PROCESS FOR MANUFACTURING Al FOAMS", Scripta materialia. 44 (2001) 105–110
- [7] E. Koza, M. Leonowicza, S. Wojciechowska, F. Simancik, "Compressive strength of aluminium foams", Materials Letters 58 (2003) 132– 135
- [8] مهدی دیواندری، علیرضا وحید گلپایگانی، حمیدرضا شاهوردی، فوم‌های فلزی، 1385، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران.
- [9] C. Gaillard, J.F. Despois, A. Mortensen, "Processing of NaCl powders of controlled size and shape for the microstructural tailoring of aluminium foams", Material Science and Engineering A 374 (2004) 250-262
- [10] A. Bendell, J. Disney and W.A. Pridmore, Taguchi Methods: Applications in World Industry, IFS Publications, UK, 1989.
- [11] G. Taguchi, Introduction to Quality Engineering, Asian Productivity Organization, Tokyo, 1990.
- [12] Jiang Bin, Wang Zejun, Zhao Naiqin, "Effect of pore size and relative density on the mechanical properties of open cell aluminum foams", Scripta Materialia 56 (2007) 169–172
- [13] Joseph F. Rakow, Anthony M. Waas, "Size effects and the shear response of aluminum foam", Mechanics of Materials 37 (2005) 69-82