

خواص مکانیکی فوم فلزی A356 غنی شده با مس و اثر عملیات پیرسازی بر آن

محمد حسین میرباقری^۱، حامد والی^۲، حسن سلطانی^۳

۱- دانشیار دانشکده مهندسی متالورژی دانشگاه صنعتی امیرکبیر، smhmirbagheri@aut.ac.ir

۲- کارشناس مهندسی متالورژی دانشگاه صنعتی امیرکبیر، hamedpersianboy.vali@gmail.com

۳- کارشناس مهندسی متالورژی دانشگاه صنعتی امیرکبیر، soltani.hsn@gmail.com

Effect of ageing heat treatment on the mechanical behavior of Cu rich A356 metal foam

M.H.Mirbagheri¹, H.Vali², H.Soltani³

1-Associate of material and metallurgy engineering, Department of Mining and Metallurgical Engineering Amirkabir University Of Technology, E-Mail: smhmirbagheri@aut.ac.ir

2-Bachelor of material and metallurgy engineering, Department of Mining and Metallurgical Engineering Amirkabir University Of Technology, E-Mail: hamedpersianboy.vali@gmail.com

3-Bachelor of material and metallurgy engineering, Department of Mining and Metallurgical Engineering Amirkabir University Of Technology, E-Mail: soltani.hsn@gmail.com

چکیده

هدف از پژوهش حاضر ابتدا ارایه دانش فنی ساخت فوم آلایزی پایه آلومینیم است. به این منظور فوم A356 تهیه شد و سپس مذاب A356 با ۴ درصد مس آلایز سازی شد و سپس توسط عامل حباب زای TiH_2 فوم فلز مذکور تهیه شد. وجود ۴-۵ درصد مس در آلایز A356 می تواند آن را مستعد به عملیات پیرسازی نماید. لذا سیکل عملیات پیرسازی برای فوم مذکور انجام گرفت و ساختار سلولی دو فوم و همچنین خواص مکانیکی آنها مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان می دهد ساختار فوم حاوی مس دارای حباب های گرد با سطح صاف می باشد در صورتیکه فوم آلایز A356 دارای حفره های با سطوح چروکیده و بیضوی بوده. خواص مکانیکی استحکام تسلیم و انرژی سطح زیر منحنی تنش-کرنش این دو نمونه نشان از افزایش ۱/۷ برابری استحکام نمونه حاوی مس و پیرسازی شده است. همچنین انرژی جذب آن طی آزمون فشاری تک محوره ۱۶۰ درصد نسبت به نمونه عملیات حرارتی نشده افزایش یافت. لذا می توان برای دست یابی به خواص مکانیکی بالاتر بین ۴-۵ درصد مس به آلایز A356 افزود و سپس آن را به فوم تبدیل نمود و با عملیات انحلالی سازی در دمای ۵۱۰ درجه سلسیوس به مدت زمان ۱۲ ساعت و سپس کوئنچ آن در آب سرد و به دنبال آن عملیات پیر سازی در دمای ۱۶۰ درجه سلسیوس به مدت ۳ ساعت روی فوم مذکور به هدف فوق دست یافت. واژه های کلیدی: عملیات حرارتی پیرسازی، فوم آلومینیم A356، مس، آزمون فشار تک محوره، خواص مکانیکی.

Abstract

In this research the main purpose was finding and improving a technical and practical process to produce aluminum based foam. As a result; aluminum-A356 foam was produced using melting process, the molten A356 was alloyed by adding 4%Wt of Copper(4%WtCu-Al) to be apt for aging, then foam was produced by using TiH_2 Nano scale powder as foaming agent. Ageing heat treatment cycle was performed on alloyed foam then cell structure and mechanical properties for both alloyed and not alloyed foam was compared. Results was shown cell structure for the foam with Cu is spherical with smooth layer which is crooked and elliptical that for A356-foam. The uniaxial compressive yield strength, as a result of this heat treatment cycle, was increased from 10 to 27.5 MPa, about 170% increase in yield strength. The energy absorption, was measured by uniaxial compressive loading, was shown an increase of about 160% for the aged alloy in comparison to non-heat-treated specimen. So to achieve this final properties adding 4-5 percent of Cu following the heat treatment cycle is the main result of this research. The cycle, solution process at 510 °C for 12 hours and then quenching in cold water, carrying on the process by aging at 160 °C for 3 hours culminate in best mechanical properties for A356+4%wt.Cu.

Keywords: Aging heat treatment, A356 Aluminum Foam, Copper, Uniaxial compression test, Mechanical properties.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیم - سیلیسیم A356

ترکیب	سیلیسیم	منیزیم	منگنز	تیتانیوم	مس	آهن	روی	آلومینیم
درصد وزنی	۶/۵-۷/۵	۰/۳-۰/۴	۰/۵	۰/۲	۰/۱	۰/۱۲	۰/۰۵	مابقی

جدول ۲- مشخصات پودر حباب زا TiH_2

ترکیب شیمیایی	شرکت سازنده	کشور سازنده	مش	درصد خلوص
TiH_2	SIGMA - ALDRICH	آلمان	-۳۲۵	۹۸

مقدمه

حسینی، ۱۳۹۲؛ میرباقری و طباطبایی مجد، ۱۳۹۲). در فوم‌های سلول بسته بیشتر آزمون‌های مکانیکی مد نظر محققین بوده است و در این زمینه مقالات زیادی منحنی‌های تنش-کرنش فوم‌ها را مورد بررسی و آنالیز دقیق قرار داده‌اند و خواص مکانیکی نظیر مدول یانگ، استحکام تسلیم، کرنش چگالش و سطح زیر منحنی تنش-کرنش را به عنوان انرژی جذب تغییر فرم پلاستیک اندازه گیری نموده و برای فوم‌های متنوع و در شرایط متنوع مورد مقایسه قرار داده‌اند تا کاربر بر اساس نیاز خود بتواند فوم مورد نظر خود را انتخاب و مصرف نماید و یا خواص مورد نظر خود را در این فوم بهینه سازد (میرباقری و پورغلام، ۱۳۹۲؛ Vendra & Rabiei, 2009؛ Miyoshi, Itoh, Akiyama & Kitahara, 2000). در این میان تعدادی از مقالات اثر عملیات حرارتی پیرسازی را بر خواص مکانیکی آلیاژهای آلومینیم سری دوهزار یا هفت هزار ارایه داده‌اند (Bekheet, Gadelrab, Salah & El-Azim, 2002; Mandal & Viswanathan, 2013; Bhushan, Kumar & Das, 2013; Campana & Pilone, 2009) مطالعه این مقالات گاه نتایج ضد و نقیض را با هم‌دیگر داشته و حتی با مقایسه با انجام همین عملیات روی نمونه‌های متراکم (غیر فومی) بعضاً توافق و همخوانی ندارد. لذا هنوز مکانیزم استحکام بخشی فوم‌های فلزی بوسیله عملیات حرارتی پیرسازی مشخص نشده و ارزش مطالعه در این زمینه به قوت خود باقی مانده است. نکته قابل تأمل برای کسانی که در زمینه فوم‌های فلزی تحقیق نموده‌اند این است که حوزه صنعتی بین فوم‌ها بیشتر محدود به فوم‌های آلومینیم خالص بوده است (Sa- (jjadi, Ezatpour & Parizi, 2012). از اینرو در پژوهش حاضر سعی شده فوم آلومینیمی A356 مقدار مناسبی فلز مس اضافه شود سپس سیکل عملیات حرارتی پیرسازی بهینه، برای بدست آوردن خواص مکانیکی حداکثری ارایه شود.

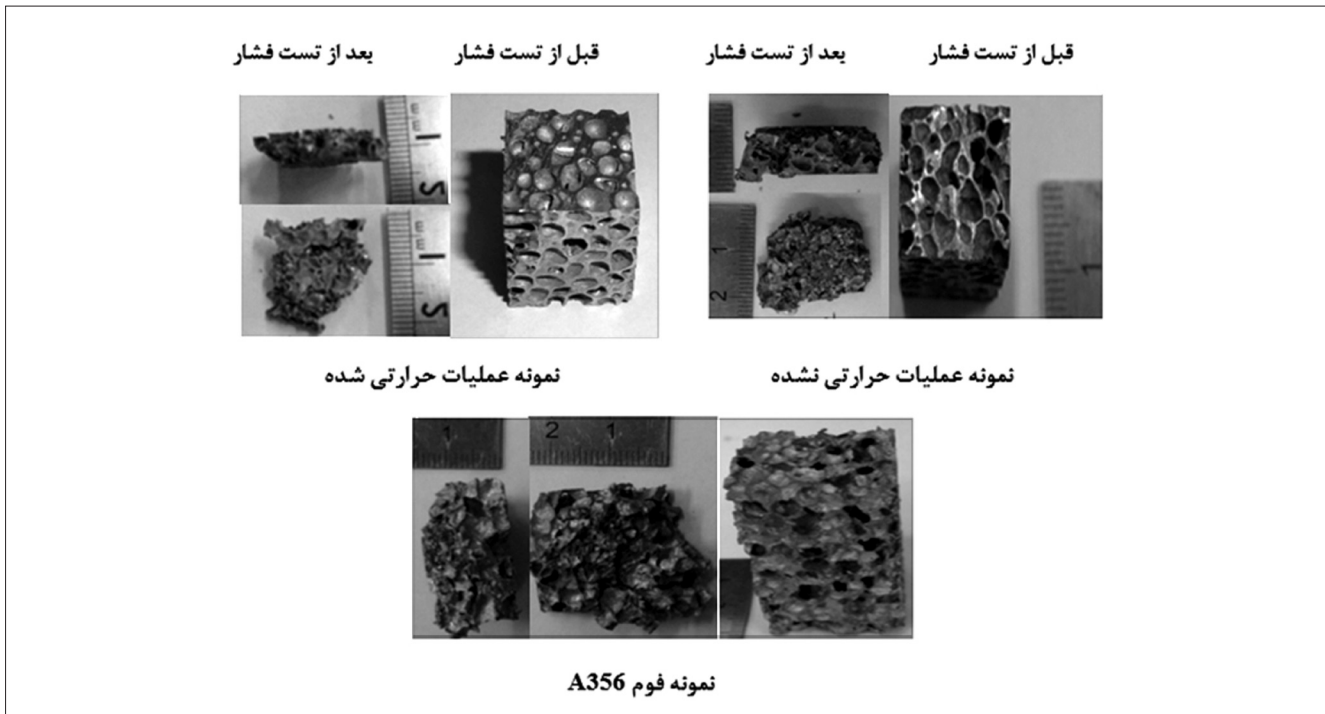
مواد و روش تحقیق

آلیاژ پایه آلومینیم A356، طبق استاندارد آمریکا به عنوان شمش مصرفی در تهیه فوم مورد استفاده قرار گرفت؛ ترکیب شیمیایی آن در جدول ۱ آمده است.

بطور کلی فوم‌های فلزی در دو گروه فوم سلول باز و سلول بسته تولید می‌شوند. فوم‌های سلول بسته در صنایع جذب انرژی مکانیکی، صوت، حرارت و ضربه کاربرد ویژه دارند. اما فوم‌های سلول باز بیشتر در صنایع باتری سازی و فیلتراسیون و مبدل‌های حرارتی کاربرد تجاری دارند. از بین روش مختلف تولید فوم در پژوهش حاضر روش ذوبی به کمک تزریق عامل حباب زا مد نظر است لذا تحقیقات انجام شده در این زمینه ارایه می‌شود؛ سایر روش‌های تولید فوم فلزی در منابع (سلطانی، ۱۳۹۳؛ والی، ۱۳۹۳؛ دانشمند، ۱۳۸۹؛ طباطبائی مجد، ۱۳۸۷) آمده است. فوم‌های تولید شده به روش ذوبی توسط عامل حباب زا موسوم به فوم Alopros هستند. اساس روش تولید این فوم‌ها مانند افزودن پودر لباس شویی به آب است که با هم زدن شدید آن کف یا فوم تولید می‌شود. اما در مذاب آلومینیم عامل کف زا موادی هستند که در اثر حرارت و هم زدن توسط پروانه‌های فولادی، گازهایی مانند هیدروژن و کربنات تولید می‌کنند، مانند پودر هیدرید تیتانیوم و کربنات کلسیم (Ashby, et al., 2000; Matijasevic-Lux, Banhart, Fiechter, Gorke & Wanderka, 2006). اما دانش فنی تولید فوم به این روش بسیار پیچیده است و به راحتی با اضافه کردن این مواد به مذاب آلومینیم، فوم همگن و پایداری به دست نمی‌آید. منابع مختلف نکات کلیدی متفاوتی را ارایه می‌دهند، بعضی‌ها تنظیم دمای ذوب را عامل اساسی رسیدن به فوم با ساختار همگن می‌دانند (Farkašová, Tillová & Chalupová, 2013)، بعضی دیگر کنترل دمای پف سازی و مدت زمان پف سازی را عامل اصلی می‌دانند (Bhakta & Ruckenstein, 1997)، اما گروهی دیگر اضافه نمودن موادی به نام ویسکوز ساز را برای رسیدن به فوم همگن لازم می‌دانند (Ip, Wang & Toguri, 1999). از جمله این مواد می‌توان به فلز خالص کلسیم یا پودر کاربید سیلیس یا سیلیس تنها اشاره نمود (طباطبائی مجد، ۱۳۸۷؛ Ashby, et al., 2000). پس از تهیه فوم با دانسیته دلخواه آن را سریع منجمد نموده و بسته به نیاز کاربر آزمون‌های مختلفی روی آن انجام می‌گیرد (موحدی، میرباقری و

جدول ۳- مشخصات مواد مصرفی در تهیه مذاب فوم در پژوهش حاضر

Al-A356	Cu	TiH ₂	Ca	ترکیب
۱۳۴۵/۸	۵۳/۸	۱۳/۴۶	۲۶/۹۲	وزن (گرم)
۹۳	۴	۱	۲	درصد وزنی



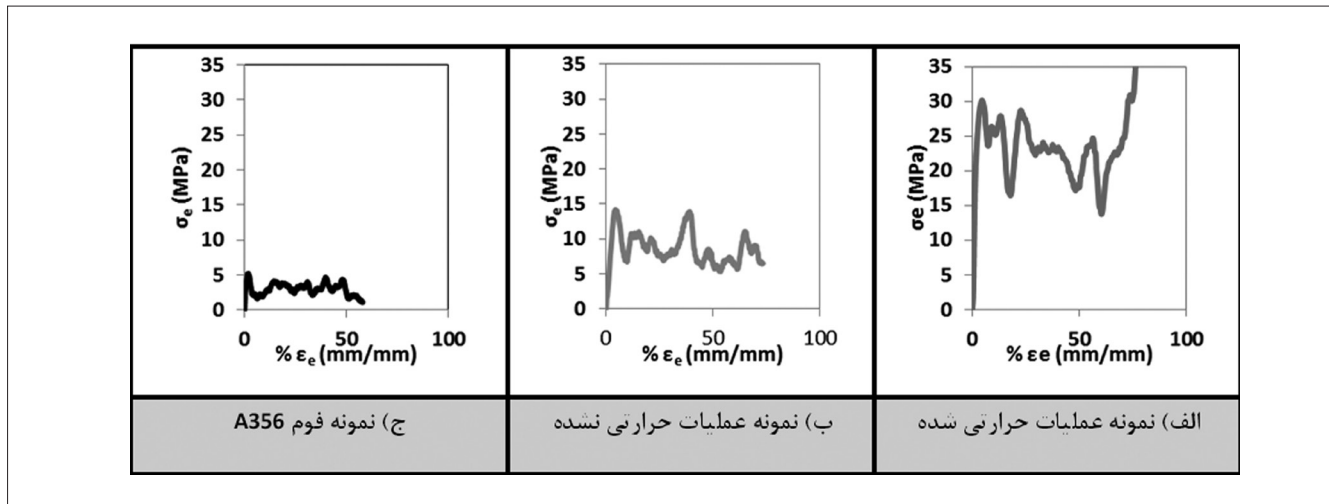
شکل ۱- تصاویر ظاهری نمونه‌ها قبل و بعد از آزمون فشار تک محوره

در مرحله بعد باید این مذاب آلیاژی سریع به فوم مذاب تبدیل شود. بدین منظور در این مرحله پودر TiH_2 عملیات حرارتی شده (موحدی، میرباقری و حسینی، ۱۳۹۲)، معادل ۱٪ وزنی، به مذاب در دمای $640^\circ C$ اضافه شده. سپس مذاب به داخل قالب فولادی گرمکار که قبلاً در کوره دیگری تا دمای $680^\circ C$ درجه پیش گرم شده بود ریخته شد و قالب به همراه مذاب داخل آن وارد کوره دیگری که دمای آن در $680^\circ C$ تنظیم و ثابت شده بود منتقل شد و به مدت زمان ۸۰ ثانیه نگهداری شد تا مذاب پف نماید. در مرحله آخر قالب پر از فوم از کوره خارج و سریع سرد شد. سپس مراحل آماده سازی نمونه‌های فومی برای انجام آزمون‌های مکانیکی و متالوگرافی انجام شد. نمونه فوم آلومینیومی ریخته گری شده، با ابعاد تقریبی $15 \times 10 \times 20$ میلی‌متر برش خورد و ابعاد دقیق و وزن آن‌ها اندازه گیری و ثبت شد. از این نمونه‌ها برای مشخص شدن بهترین سیکل عملیات حرارتی پیرسازی که بالاترین استحکام فشاری را داشته باشند استفاده شد. کارهای قبلی نویسندگان نشان داده که سیکل عملیات انحلالی سازی در دمای $510^\circ C$ درجه سلسیوس به مدت زمان ۱۲ ساعت و سپس کوئنچ آن در آب سرد و به دنبال

همچنین در آلیاژ سازی ثانویه قبل از فوم سازی از فلز کلسیم برای افزایش ویسکوزیته مذاب به منظور پایداری حباب در مذاب و همچنین افزودن فلز مس برای ایجاد قابلیت پیرسازی استفاده شده است. برای فوم سازی از نانو پودر TiH_2 به عنوان حباب زا استفاده شده است که مشخصات دقیق آن در جدول ۲ آمده است. طراحی ترکیب شیمیایی و مقدار مواد افزودنی به مذاب آلومینیم برای تولید فوم فلزی با قابلیت پیرسازی بر اساس مقالات موجود و محدوده خمیری دیاگرام فازی آنها مطابق جدول ۳ انتخاب شد. برای آلیاژسازی ابتدا شمش آلیاژ آلومینیوم A356 به وزن $1345/8$ گرم داخل بوته فولادی قرار داده شد و با انتقال به داخل یک کوره برقی المنتی با قابلیت کنترل دما با دقت مثبت و منفی ۵ درجه، در دمای $640^\circ C$ ذوب شد. سپس $53/8$ گرم سیم مسی، معادل ۴٪ وزنی، به آن اضافه شد و توسط هم زن دستی با سرعت 2800 دور بر دقیقه هم زده شد در مرحله بعد دمای مذاب به مقدار $640^\circ C$ رسانده شد. سپس فلز کلسیم خالص، معادل ۲٪ وزنی، به صورت تکه‌های کوچک به مذاب در حال هم زدن افزوده شد. در این مرحله ترکیب شیمیایی مذاب مورد نظر، مطابق جدول ۳ تنظیم و آلیاژسازی شد.

جدول ۴- مشخصات نمونه فوم‌های طراحی شده در پژوهش حاضر

نام نمونه	ارتفاع h (cm)	طول a (cm)	عرض b (cm)	وزن W (g)	سطح مقطع A (cm ²)	حجم V (cm ³)	چگالی ρ (g cm ⁻³)
عملیات حرارتی شده	۲/۲۴۲	۱/۵۵۵	۱/۴۲۷	۲/۶۰۰	۲/۲۳۴	۵/۰۱۰	۰/۷۱۹
عملیات حرارتی نشده	۲/۰۹۳	۱/۵۱۶	۱/۵۱۷	۲/۹۰۰	۲/۳۰۰	۴/۸۱۳	۰/۶۰۲



شکل ۲- مقایسه رفتار تغییر فرم فشاری تک محوره سه نوع فوم: الف- فوم A356 حاوی ۴ درصد مس عملیات حرارتی شده. ب- فوم A356 حاوی ۴ درصد مس عملیات حرارتی نشده. ج- فوم A356

حرارتی نشده نیز ارتفاع اولیه نمونه از ۲۲ میلی‌متر به مقدار ۸ میلی‌متر کاهش داشت. همچنین مقایسه میزان ریزش جرم نمونه‌هایی آزمون فشار نشان داد نمونه عملیات حرارتی شده می‌تواند ترد تر باشد. استحکام، مدول الاستیک و سطح زیر منحنی نمونه عملیات حرارتی شده به میزان قابل توجهی باید بالاتر باشد. در ادامه برای مقایسه بهتر خواص مکانیکی این نمونه‌ها، نمودار ستونی آنها برای حالت معمولی و نرماله شده نسبت به چگالی هر فوم (که معروف به خواص مشخصه یا خواص ویژه است) به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ آورده شده است.

همچنین منحنی تنش-کرنش هر دو نمونه بطور یکجا در یک نمودار در شکل ۵ رسم شده است تا اثر سیکل پیرسازی بر افزایش قابل ملاحظه این فوم بطور ملموسی مشخص شود و تاثیر عملیات حرارتی پیرسازی را بر روی خواص مکانیکی فوم به خوبی نشان دهد.

آنالیز ساختاری حفره‌ها

با توجه به سطح ظاهری نمونه‌ها که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، ساختار سلولی حباب‌ها در تمامی نمونه‌ها نسبت به نمونه فوم A356، دارای حباب‌های همگن و بیضی شکل هستند و چروکیدگی سطح داخلی حباب‌ها در نمونه‌های حاوی ۴ درصد مس، بطور قابل ملاحظه ای حذف شده است، برخلاف نمونه

آن عملیات پیر سازی در دمای ۱۶۰ درجه سلسیوس به مدت ۳ ساعت بهترین خواص را برای این فوم ارائه می‌دهد (سلطانی، ۱۳۹۳؛ والی، ۱۳۹۳). در این تحقیق آزمون فشار تک محوری توسط دستگاه «Instron 8502» ۲۵ تنی و با نرخ کرنش ۳-۱۰ واحد بر ثانیه برای نمونه‌ها انجام شد. در این آزمون با رعایت نسبت ارتفاع به قطر ۱/۵، از دو نوع نمونه مکعبی با ابعاد تقریبی ۲۵×۲۵ میلی‌متر با ارتفاع ۵۰ میلی‌متر استفاده شده است.

نتایج و بحث

شکل ۱ تصاویر ظاهری و ساختار حباب‌های نمونه‌های فومی با مشخصات مندرج در جدول ۴ را قبل و بعد از آزمون فشار نشان می‌دهد.

نمودارهای تنش-کرنش هر دو نمونه عملیات حرارتی شده و نشده و نیز فوم A356 در شکل ۲ ارائه شده است.

(ج) نمونه فوم A356 (ب) نمونه عملیات حرارتی نشده

(الف) نمونه عملیات حرارتی شده

خواص مکانیکی از نمودارهای شکل ۲ استخراج شده و در جدول ۵ آورده شده است تا مقایسه بین آنها از لحاظ کمی بهتر انجام گیرد.

در نمونه عملیات حرارتی شده طی آزمون فشار، ارتفاع نمونه از ۲۲ میلی‌متر به مقدار ۵ میلی‌متر کاهش می‌یابد. برای نمونه عملیات

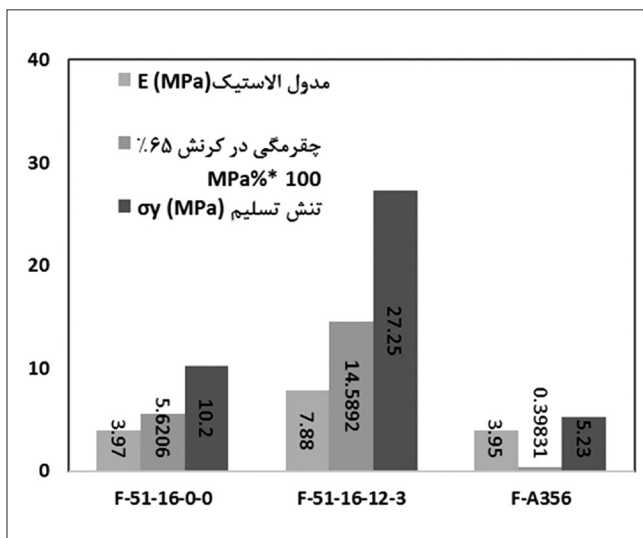
جدول ۵- خواص مکانیکی استخراج شده از نمودارهای تنش- کرنش

نام نمونه	تنش تسلیم σ_y (MPa)	مدول الاستیک E (MPa)	چقرمگی در کرنش ۰.۶۵ %
عملیات حرارتی شده	۲۷/۲۵	۷/۸۸۰	۱۴۵۸/۹۲
عملیات حرارتی نشده	۱۰/۲۰۰	۳/۹۷۰	۵۶۲/۰۶

می‌شود پدیده کشیده شدن حباب‌ها و نازک شدن دیواره‌های سلولی و به دنبال آن پارگی حباب‌ها به تعویق بیافتد و فوم فلزی می‌تواند با پف کردن بیشتر، با دانسیته‌های پایین‌تر منجمد شود. لذا مهندسی‌هایی که فوم فلزی تهیه می‌نمایند به تجربه دریافته اند هر چه دامنه انجماد آلیاژ بیشتر و طول منطقه مخلوط جامد- مذاب طی انجماد وسیع تر باشد، عموماً ساختار سلولی فوم‌های فلزی، همگن تر و پایدارتر خواهند بود (طباطبائی مجد، ۱۳۸۷). پروژه حاضر هم این مطلب را تایید نموده است. لذا می‌توان ادعا نمود در مرحله فوم سازی در مذاب فوم، افزودن ۴ درصد وزنی مس به آلیاژ A356 منجر به ساختار حبابی همگن تر با فاکتور کرویت نزدیک به یک می‌شود.

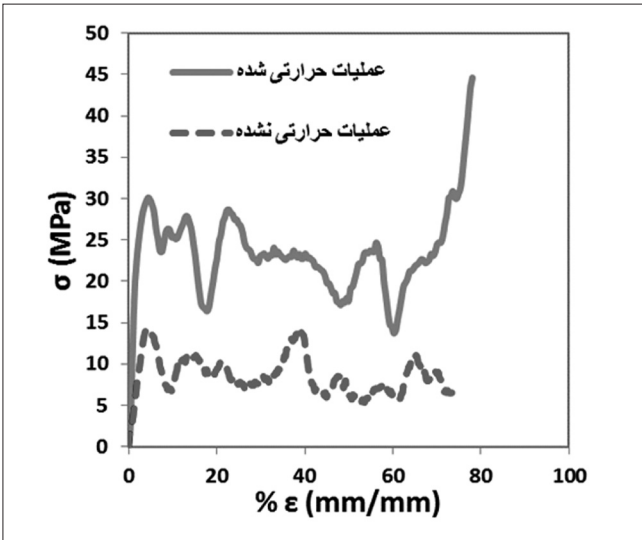
آنالیز خواص مکانیکی

ساختار همگن حباب‌ها باعث می‌شود تک تک دیواره‌های نسبتاً کروی حباب‌ها مقاومت بیشتری در برابر کمانش پلاستیک پیش‌رونده در هنگام بارگذاری تک محوری فشاری از خود نشان دهند، که این مقاومت عموماً توسط رسم منحنی نیرو-جابجایی بررسی و آنالیز می‌شود (والی، ۱۳۹۳). این مطلب را می‌توان تا حدودی از مقایسه ظاهری نمونه‌های له شده در بارگذاری محوری فشاری در شکل ۱ نیز مشاهده نمود. نمونه فوم آلیاژ A356 پس از له شدن ضخامت کمتری داشته و میزان تلاشی ساختار ظاهری آن بیشتر است. نتایج آزمون فشار تک محوری برای تمام نمونه‌ها در شکل ۲ ارائه شده است. با مقایسه نتایج استحکام تسلیم این نمونه‌ها مشاهده می‌شود فوم عملیات حرارتی شده بالاترین استحکام تسلیم توام با بالاترین چقرمگی یا سطح زیر منحنی تنش-کرنش (جذب انرژی) را داشته است. لذا نمونه عملیات حرارتی شده دارای افزایش ۱۶۷ درصدی نسبت به نمونه خام بوده است که از لحاظ صنعتی بسیار مناسب است. رفتار منحنی تنش- کرنش بین نمونه عملیات حرارتی نشده و نمونه عملیات حرارتی شده که در شکل ۵ نشان داده شده است، به خوبی مشخص می‌کند که عملیات حرارتی پیرسازی بهترین گزینه از لحاظ بهبود خواص مکانیکی است زیرا تنش تسلیم نسبت به نمونه عملیات حرارتی نشده ۱۶۷ درصد و چقرمگی له شدن به میزان ۱۶۰ درصد (از ۵۶۲ به ۱۴۵۹ MPa بر واحد حجم) توامان با هم افزایش یافته است. مقایسه خواص مکانیکی مستخرج از نمودارهای تنش-کرنش شکل ۲ در نمودارهای شکل ۳ و ۴ به ترتیب به ازای واحد حجم و به صورت نرماله شده بر حسب چگالی فوم، بطور بارزی نشان می‌دهد که فوم عملیات حرارتی شده نسبت به نمونه‌های فوم A356 و فوم حاوی مس عملیات حرارتی نشده خواص مکانیکی بالاتر به لحاظ تحمل بارگذاری فشاری تک محوره

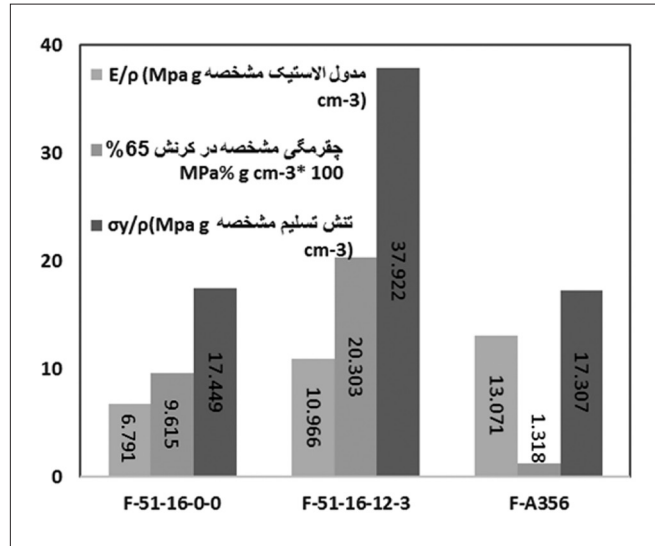


شکل ۳- خواص مکانیکی نمونه‌های فومی مستخرج شده از شکل ۲

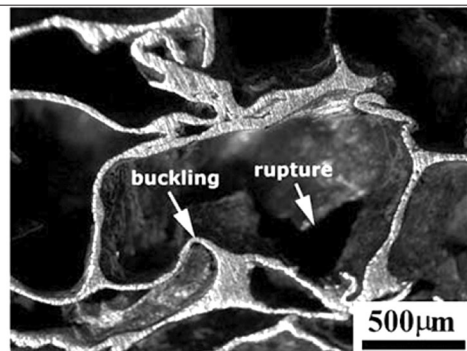
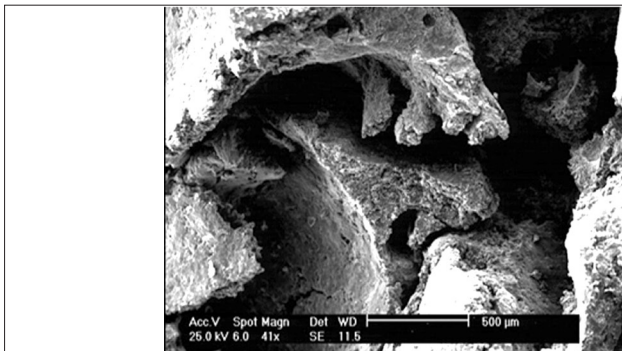
فوم A356 که حفره‌های چروکیده و نامتقارن دارد. لذا در یک نتیجه گیری اولیه از مشاهده ساختار حباب‌های توأم متوجه شده که نمونه‌های حاوی ۴ درصد مس توانسته اند ساختار همگن تری را داشته باشند. نتایج شمارش حباب‌ها توسط نرم افزار آنالیز تصویر کلیمکس در واحد اینچ مربع طبق استاندارد برای نمونه‌های حاوی ۴ درصد مس، بین ۲۲-۳۷ PPI و نسبت کرویت متوسط ۰/۷۳ بوده در صورتیکه در نمونه بدون مس بین ۲۹-۳۴ PPI و نسبت کرویت متوسط ۰/۴۵ بوده است. لذا با مقایسه فاکتور کرویت، که در صورتیکه همه حفره‌ها کروی باشد مقدار آن واحد است و با خروج از حالت کروی این عدد کوچکتر از یک خواهد بود، می‌توان گفت از لحاظ کمی نیز نمونه خام که مس ندارد، حفره‌های کشیده و چروکیده تری دارد. این عامل را می‌توان همانطور که در مقدمه بیان شد، به علت افزایش ویسکوزیته مذاب در اثر افزودن مس دانست؛ زیرا ۴ درصد وزنی افزایش مس، افزایش برد انجمادی در حدود ۴۸-۵۰ درجه سیلسیوس بین خطوط لیکوئیدوس و سالییدوس خواهد داشت. نکته مهم تر اینکه این مطلب در حضور وجود ۶ درصد وزنی سیلیسیم در آلیاژ A356 در دیاگرام فازی سه تایی Al-Si-Cu باعث بیشتر شدن دامنه انجماد تا حدود ۶۰ درجه سیلسیوس می‌شود (سلطانی، ۱۳۹۳؛ Farkašová, Tillová & Chalupová, 2013; Raghavan, 2007). لذا وجود ذرات بسیار ریز سیلیس به همراه ویسکوزیته بالاتر مذاب سه تایی Al-Si-Cu، باعث



شکل ۵- مقایسه تست فشار برای نمونه‌های عملیات حرارتی شده و عملیات حرارتی نشده A356-4wt.%Cu



شکل ۴- خواص مکانیکی مشخصه (تقسیم بر دانسیته) نمونه‌های فومی مستخرج شده از شکل ۲



شکل ۶- سمت راست: ساختار له شده A356 طی آزمون فشار (Elbir, Yilmaz, Toksoy & Guden, 2003). سمت چپ: ساختار له شده A356-4wt.%Cu

نکرده و شروع به خرد شدن می‌کنند و مانند آوار داخل همدیگر می‌ریزند و هر کدام مانند صفحات تقویتی در برابر تغییر فرم مقاومت می‌کنند تا خرد شوند؛ هر دسته صفحه که خورد می‌شود یک افت نوسانی در نمودار تنش-کرنش ایجاد می‌کند، لذا نوسانات تنش کرنش در منطقه پایا از نمودارهای شکل ۲ به همین علت است. آنچه می‌توان از مقایسه نمودارهای شکل ۲ و تصاویر شکل ۶ بدست آورد این است که سطح زیر منحنی نمونه عملیات پیرسازی شده بسیار بالاتر از نمونه A356 است. اگرچه نوسانات A356-4wt.%Cu بیشتر از نمونه A356 است. لذا بنظر می‌رسد خرد شدن ساختار سلولی و در هم ریختن آن بصورت آوار، جذب انرژی بالاتری داشته باشد. اما مقایسه تمام خواص مکانیکی فوم‌ها بصورت مشخصه (تقسیم بر دانسیته) می‌تواند دقیق تر باشد، چرا که در طراحی اندیس ماده همواره دانسیته در مخرج کسر است و کوچک شدن آن کاهش جرم را به همراه خواهد داشت، چیزی که در مهندسی به واسطه سبکی و ارزانی قیمت نرماله شده،

دارد. نکته قابل تامل دیگر در تغییرات مدول الاستیک طی عملیات پیرسازی است. در نمونه‌های دنس عموماً تغییرات مدول الاستیک ناچیز است بطوریکه در طراحی‌ها برخلاف تنش تسلیم، تفاوتی بین مدول الاستیک نمونه عملیات حرارتی شده و نشده قابل نیستند. اما به نظر می‌رسد در مورد فوم فلزی نمی‌توان به این راحتی تصمیم گرفت. در شکل ۵ ملاحظه می‌شود مدول الاستیک یا شیب منحنی تنش-کرنش نمونه عملیات حرارتی شده از نمونه عملیات حرارتی نشده بیشتر است. در جدول ۵ این تغییر از ۲/۹ به ۳/۸ GPa V/ρ بوده است، که حدود دو برابر شده است یا می‌توان گفت ۱۰۰ درصد افزایش داشته است. در شکل ۶ مقایسه ساختار سلولی دو فوم A356 و A356-4wt.%Cu طی آزمون فشار تک محوره انجام گرفته است.

ملاحظه می‌شود که ساختار A356 نرماله طی بارگذاری فشاری تمام سلول‌ها ابتدا له شده و کماتش پلاستیک رخ می‌دهد، اما در نمونه A356-4wt.%Cu برعکس طی آزمون فشار سلول‌ها کماتش

L. (2000). Metal Foams: A Design Guide. Butterworth-Heinemann.

- ۲- دانشمند، م. (۱۳۸۹). بررسی اثر مس بر ساختار سلولی و خواص مکانیکی فوم آلایژ A356. تهران: دانشگاه امیرکبیر.
- ۳- سلطانی، ح. (۱۳۹۳). بررسی عملیات پیرسازی فوم آلایژ A356 حاوی عنصر مس بر خواص مکانیکی و جذب انرژی آن. تهران: دانشگاه امیرکبیر.
- ۴- طباطبائی مجد، س. ی. (۱۳۸۷). بررسی ساختار سلولی فوم‌های فلزی و مدلسازی آن. تهران: دانشگاه امیرکبیر.
- ۵- موحدی، ن.، میرباقری، م. و حسینی، س. (۱۳۹۲). اثر عوامل ریخته‌گری در تولید فوم آلومینیومی A356 بر رفتار تغییر شکل پلاستیک طی آزمون فشار تک محوری. ریخته‌گری، ۳۴.
- ۶- میرباقری، م. و پورغلام، ر. (۱۳۹۲). ریخته‌گری فوم آلومینیوم A356 سلول بسته به کمک مخلوط مذاب و سیلیکون-دولومیت گرانوله و بررسی رفتار فشاری آن. ریخته‌گری، ۳۸.
- ۷- میرباقری، م. و طباطبائی مجد، ی. (۱۳۹۲). اثر عوامل فرآیندی بر ساختار سلولی کف-جامد آلومینیومی SiC-A356 ریختگی و کمی‌سازی تخلخل آن. ریخته‌گری، ۵۶.
- ۸- والی، ح. (۱۳۹۳). بررسی اثر مس بر ساختار سلولی و خواص مکانیکی فوم آلایژ A356. تهران: دانشگاه امیرکبیر.
- 9- Bekheet, N., Gadelrab, R., Salah, M., & El-Azim, A. (2002). The effects of aging on the hardness and fatigue behavior of 2024 Al alloy/SiC composites. *Materials and Design*, 153-159.
- 10- Bhakta, A., & Ruckenstein, E. (1997). Decay of standing foams: drainage, coalescence and collapse. *Advances in Colloid and Interface Science*, 1-124.
- 11- Bhushan, R., Kumar, S., & Das, S. (2013). Fabrication and characterization of 7075 Al alloy reinforced with SiC particulates. *Int J Adv Manuf Technol*, 611-624.
- 12- Campana, F., & Piloni, D. (2009). Effect of heat treatments on the mechanical behaviour of aluminium alloy foams. *Scripta Materialia*, 679-682.
- 13- Elbir, S., Yilmaz, S., Toksoy, A., & Guden, M. (2003). SiC-particulate aluminum composite foams produced by powder compacts: Foaming and compression behavior. *Journal of Materials Science*, 4745-4755.
- 14- Farkašová, M., Tillová, E., & Chalupová, M. (2013). Modification of Al-Si-Cu cast alloy. *Faculty of Mechanical Engineering*, 210-215.
- 15- Ip, S., Wang, Y., & Toguri, J. (1999). Aluminum Foam Stabilization by Solid Particles. *Canadian Metall. Quarterly*, 81-92.
- 16- Mandal, D., & Viswanathan, S. (2013). Effect of heat treatment on microstructure and interface of SiC particle reinforced 2124 Al matrix composite. *Materials Characterization*, 73-81.
- 17- Matijasevic-Lux, B., Banhart, J., Fiechter, S., Gorke, O., & Wanderka, N. (2006). Modification of titanium hydride for improved aluminium foam manufacture. *Acta Materialia*, 1887-1900.
- 18- Miyoshi, T., Itoh, M., Akiyama, S., & Kitahara, A. (200). ALPORAS aluminum foam: production process, properties, and applications. *Advanced Engineering Materials*, 179-183.
- 19- Raghavan, V. (2007). Al-Cu-Si (Aluminum-Copper-Silicon). *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*, 180-182.
- 20- Sajjadi, S., Ezatpour, H., & Parizi, M. (2012). Comparison of microstructure and mechanical properties of A356 aluminum alloy/Al₂O₃ composites fabricated by stir and compo-casting processes. *Materials and Design*, 106-111.
- 21- Vendra, L., & Rabiei, A. (2009). A comparison of composite metal foams properties and other comparable metal foams. *Materials Letters*, 533-536.

مطلوب طراحی است. از اینرو می‌توان گفت نمونه عملیات حرارتی شده مجدداً از لحاظ ویژگی‌های مشخصه مکانیکی از نمونه خام و سایر نمونه‌های عملیات حرارتی شده، به طور قابل توجهی مطلوب تر بوده و برای طراحی و مصرف کنندگان جذاب تر خواهد بود. لذا به نظر می‌رسد سیکل عملیات حرارتی پیرسازی برای مخلوط دو آلایژ A356 و مس خالص ارایه شده در این پژوهش می‌تواند خواص مکانیکی خصوصاً تنش تسلیم را بطور قابل ملاحظه‌ای (بین ۲/۶ الی ۲/۴ برابر) بالا ببرد.

نتیجه‌گیری

۱- انجام عملیات حرارتی بر روی فوم آلایژی 4wt.%Cu-A356، به صورت انحلال در دمای ۵۱۰°C و مدت زمان ۱۲ ساعت و پیرسازی در دمای بین الی ۱۶۰°C و ۱۵۰°C و مدت زمان ۳ ساعت، باعث ایجاد استحکام σ_y ، E و جذب انرژی به ازای واحد حجم بالاتر نسبت به نمونه بدون عملیات حرارتی شده است. همچنین خواص مشخصه مذکور نیز مناسب‌ترین مقادیر را در حوزه کاربردی و صنعتی نشان می‌دهند.

۲- نتایج نشان می‌دهد که عملیات حرارتی پیرسازی برای فوم 4wt.%Cu-A356 می‌تواند خواص σ_y ، E و جذب انرژی را به ترتیب از ۱۰/۲ MPa، ۳/۹۷ MPa و ۵/۶۲ MPa به مقادیر ۲۷/۲۵ MPa، ۷/۸۸ MPa و ۱۴/۵۹ MPa تغییر دهد. این تغییرات به ترتیب نشان از افزایش ۱۶۷٪، ۹۸٪ و ۱۵۸٪ درصدی در خواص مذکور می‌باشد.

۳- انرژی مشخصه آلایژ فوم 45wt.%Cu-A356 عملیات حرارتی شده برابر ۲۰۳۰ MPa در واحد حجم است که افزایش قابل قبولی با توجه به مراجع داشته است.

۴- ساختار حفره‌های نمونه فومی 4wt.%Cu-A356 دارای فاکتور کرویت نزدیکتر به واحد بوده و از همگنی توزیع و اندازه قطر متوسط یکسان تری نسبت به نمونه فوم A356 برخوردار هستند. بطوریکه افزودن چهار درصد مس بطور چشمگیری از چروکیدگی سطح داخلی حفره‌های فوم می‌کاهد. این مطلب مقاومت به تحمل بارگذاری فشاری تک محوری فوم را نیز بالاتر برده و بنظر می‌رسد این پایداری ساختار سلولی فوم حاوی ۴ درصد وزنی مس، مدیون افزایش دامنه انجماد تقریباً ۶۰ درجه‌ای بین خطوط لیکوئیدوس و سالییدوس در دیاگرام سه تایی Al-Si-Cu و حضور ذرات شناور سیلیس می‌باشد.

منابع و مراجع

1-Ashby, M. F., Fleck, N., Evans, T., Hutchinson, J., Wadley, H., & Gibson,