

Founding Research Journal

Evaluation of Foam Defects in A356 Aluminium Allov Produced with TiH₂ and CaCO₃ Foaming Agents Without Stabilized Ceramic Particles

Milad Heidari Ghaleh 1*, Naser Ehsani², Hamid Reza Baharvandi³

1. PhD Student, Faculty of Materials and Industrial Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Mazandaran, Iran.

2. Professor, Faculty of Materials and Manufacturing Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

3. Associate Professor, Faculty of Materials and Manufacturing Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

Received: 28 May 2018 Accepted: 12 July 2018

Abstract:

In this paper, foam defects of A356 closed cell aluminum foams produced in different process were evaluated. For this purpose, the different foam samples were separately produced using two foaming agents, Titanium Hydride and Calcium Carbonate, without addition of stabilized ceramic particles into the molten metal. Foaming process using 1-2 wt.% TiH₂ was performed in the temperature ranges of 650 to 750 °C, for 0.5-2 minutes holding times. Another foaming process was also performed with 2.5-3.5 wt% CaCO3 at 700 °C and for 10-20 minutes holding time. Casting defects included the drainage, the coalescence and the cell size distribution were evaluated using the optical and scanning electron microscopic images and density measurements. The results showed that the homogeneous cellular foam of Al-Si-Mg alloys can be produced using TiH₂ and CaCO₃ foaming agents and without using the stabilized ceramic particles. The optimal foam are produced using 3 wt.% CaCO3 or using 1.5 wt.% TiH2 additions, separately. In each of two foam productions processes, the drainage and the coalescence foam defects are increased with increasing the holding time. Foamed aluminium, While the drainage and the coalescence foam defects increase with increasing the foaming temperature in TiH₂ foamed specimens and with decreasing of the mixing time in CaCO₃ foamed specimens.

Journal homepage: www.foundingjournal.ir

Please cite this article using:

Keywords:

Foam defects,

Drainage, Coalescence

Foaming agents,

Heidari Ghaleh M., Ehsani N., Baharvandi H. R., E Evaluation of Foam Defects in A356 Aluminium Alloy Produced with TiH2 and CaCO3 Foaming Agents Without Stabilized Ceramic Particles, in Persian, Founding Research Journal, 2018, 2(1) 71-80

DOI: 10.22034/FRJ.2019.187743.1085

Address: Faculty of Materials and Industrial Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Iran, P.O. Box 47148 - 71167, Tel.: +98 11 35501806, Fax: +98 11 35501801 E-mail: m.heidari@nit.ac.ir

^{*} Corresponding Author: Milad Heidari Ghaleh

فصلنامه علمى پژوهشى

یژوهشنامه ریختهگری

بررسی عیوب فوم در آلیاژ آلومینیم A356 تولید شده با استفاده از ترکیبات TiH2 و دون استفاده از ذرات پایدارکننده سرامیکی CaCO3

میلاد حیدری قلعه^{ا*}، ناصر احسانی ^۲، حمیدرضا بهاروندی ^۳

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مواد و صنایع، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، <u>m.heidari@nit.ac.ir</u> (* نویسنده مکاتبه کننده)

۲- استاد، مجتمع مواد و فناوریهای ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران، <u>nase_ehsan@yahoo.com</u>

۳- دانشیار، مجتمع مواد و فناوریهای ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران، ایران، hrbahar@alumni.ut.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۰۷ **چکیده:** بذیرش: ۱۳۹۷/۰۴/۲۱

در این تحقیق، عیوب فوم در شرایط مختلف تولید فومهای آلومینیمی A356 با سلول بسته مورد بررسی قرار گرفته	پدیرش: ۱۳۹۷/۰۴/۲۱
است. به این منظور فومها با استفاده از مواد پدیدآورندهٔ گاز هیدرید تیتانیم (TiH ₂) و کربنات کلسیم (CaCO ₃) بطور	
جداگانه و بدون اضافه کردن ذرات پایدارکنندهٔ سرامیکی به مذاب، تولید شدند. فرآیند فومشدن با استفاده از ذرات TiH ₂	
با ۲-۱ درصد وزنی در دماهای ۷۵۰-۶۵۰ درجهٔ سانتیگراد و در زمانهای نگهداری ۳۰ ثانیه الی ۲ دقیقه انجام شد.	
همچنین فرایند فومشدن توسط ذرات CaCO ₃ با ۲٫۵-۳٫۵ درصد وزنی در دمای ۷۰۰ درجهٔ سانتی <i>گ</i> راد و در زمانهای	
نگهداری ۱۰ و ۲۰ دقیقه، انجام شد. عیوب فوم شامل زهکشی، بههم پیوستگی سلولها و توزیع اندازهٔ سلول بر اساس	
بررسیهای میکروسکوپی نوری و الکترونی روبشی و چگالیسنجی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با استفاده	
از عوامل فومىساز TiH2 و CaCO3 و بدون استفاده از ذرات پايداركنندهٔ سلولها، مىتوان فوم با ساختار سلولى همگن	واژەھاى كليدى:
از آلیاژهای Al-Si-Mg تولید نمود. تولید فوم مطلوب با استفاده از ۳ درصد وزنی ترکیبات CaCO3 و یا با استفاده از	فوم آلومينيم،
۱٫۵ درصد وزنیTiH2 بدست میآید. در هر دو روش تولید فوم با افزایش زمان نگهداری، میزان عیوب زهکشی و بههم	عيوب فوم،
پیوستن سلولها افزایش مییابد. در حالی که در نمونههای فومشده توسط TiH2 با افزایش دمای فومشدن و در نمونههای	عوامل فومساز،
فومشده توسط CaCO3، با کاهش زمان همزدن، میزان عیوب زهکشی و بههم پیوستن سلولها افزایش مییابد.	زهکشی،
	بەھم پيوستگى سلولى.

۱– مقدمه

در طول دو دههٔ گذشته علاقهٔ بسیار زیادی به فومهای فلزی، به ویژه فومهای آلومینیمی بوجود آمده است. علت این امر پیشرفتهایی است که در چند سال اخیر در فرآیند تولید آنها بوجود آمده است که موجب تولید فومهای فلزی با هزینهٔ کم و کیفیت بالا شده است. این فلزات بسیار سبک، گروه جدیدی از مواد مهندسی هستند که دارای ساختار سلولی با جدیدی از مواد مهندسی هستند که دارای ساختار سلولی با چگالی کم هستند و در کاربردهای جذب انرژی بکار میروند[۲۰۱]. دو فرآیند عمدهٔ تهیهٔ فومهای آلومینیمی عبارتند از: فوم کردن از مذاب و روش متالورژی پودر. در هر دو روش، از یک عامل فومکننده استفاده می شود که تولید

گاز کرده و سبب فومی شدن فلز می شود. به طور معمول، هزینهٔ روش فوم کردن از مذاب نسبت به روش متالورژی پودر، کم تر است هر چند که هر کدام از دو روش مزایا و معایب خاص خود را دارد. یکی از روش های فوم کردن از مذاب شامل اضافه کردن یک مادهٔ پدیدآورندهٔ گاز به مذاب است که تاکنون تحقیقات متعددی دربارهٔ فوم کردن آلومینیم توسط این روش انجام شده است [۵–۳]. در فوم کردن مذاب، دو پدیدهٔ زهکشی^۱ و به هم پیوستگی سلولی^۲ مطرح است که مضر بوده و همگنی فوم را کاهش می دهند. زهکشی، جاری شدن مذاب به پایین قطعه در اثر چگالی بیشتر نسبت به حباب و ایجاد یک ناحیهٔ بدون حباب در داخل و به خصوص

[\] Drainage



انجمن علمى ريختهگرى ايران

پایین قطعه است و بههم پیوستگی سلولی، عبارت از بههم پیوستن چند حباب (سلول) و تشکیل یک حباب بزرگ تر است[۶،۵]. عوامل موثر بر عیوب زهکشی و بههم پیوستگی سلولها عبارتند از: سرعت و زمان همزدن، مقدار مادهٔ پدیدآورندهٔ گاز، دما و زمان فوم شدن که با انتخاب مناسب متغیرهای فوق می توان فوم هایی با عیوب کم تر و ساختار همگن تر تولید کرد. بسیاری از خواص فوم های فلزی مانند جذب انرژی، جذب صدا، انتقال حرارت و خواص مکانیکی، به ساختار سلولها و میزان همگنی آنها و عیوب موجود در فرایند تولید، بستگی دارند [۷]. کنترل ساختار سلولی فوم ها در حین تولید و کاهش عیوب ریخته گری، بسیار مهم و مشکل بوده و در اکثر مطالعات انجام شده، اثرات ناشی از این عیوب تولیدی در آزمایش ها و نتایج به دست آمده، لحاظ نشده است [۲۰].

در فومهای با سلول بسته، سطح مشترک مذاب/جامد در وجوه و دیوارههای سلول قرار دارد و سلولها توسط وجوه و دیواره از هم جدا میشوند. جریان مذاب ناشی از نیروی ثقل و مویینگی، موجب تغییرات چگالی ناخواسته در طول قطعه میشود که تشکیل یک شبکهٔ پیوسته را میدهند. تاکنون میشود که تشکیل یک شبکهٔ پیوسته را میدهند. تاکنون فومها و زهکشی و بههم پیوستگی و شبیهسازی آنها انجام شده است [۸–۱۱].

گرگلی و همکاران[۸]، زهکشی را در فوم کردن آلومینیم توسط TiH2 و CaCO3 و در حضور ذرات پایدارکنندهٔ SiC بررسی کرده و بیان نمودند که با کاهش زمان نگهداری در دمای فومشدن، میزان زهکشی کاهش مییابد. یانگ و همکاران[۳] هم گزارش دادند که ویسکوزیتهٔ نامناسب همراه با زمان نگهداری بیش از حد، منجر به زهکشی و پارگی دیوارهٔ سلول میشوند. بیاکوا و همکاران [۴] خواص دیواره سلولی و فشاری فومهای آلومینیم فومشده توسط TiH2 و CaCO3 و افزودن دمج به عنوان پایدارکننده را بررسی کرده و فومهایی با چگالی نسبی ۲۰–۱۰/۷ با ساختار سلولی همگن تولید نمودند.

در اغلب تحقیقات انجام شده بر روی فومهای آلومینیمی، برای پایداری فومها و عدم تخریب دیوارهٔ سلولی درحین فرآیند فومشدن، از ذرات سرامیکی مانند SiC و Al₂O₃ و Ca با اندازهها و کسر حجمی متفاوت، استفاده شده است [17–17]. این ذرات، نقش پایدارکنندهٔ حبابها را داشته و از بههم پیوستگی آنها و تخریب دیوارهٔ حبابها جلوگیری

مینمایند. البته می توان در برخی از آلیاژهای آلومینیم بدون استفاده از این ذرات هم، فومهای مناسبی تولید نمود که در نتیجه کاهش قابل ملاحظهای در هزینهٔ تولید بوجود می آید[۱۸–۱۷].

با توجه به اینکه تاکنون عیوب زهکشی و بههمپیوستگی سلولی در آلومینیم A356 فومشده توسط مادهٔ پدیدآورندهٔ گاز CaCO3 بدون استفاده از ذرات پایدارکننده، بررسی نشده است در این مقاله، این عیوب در فرآیند فومکردن این آلیاژ توسط دو مادهٔ پدیدآورندهٔ گاز CaCO3 و TiH2 مورد ارزیابی قرار گرفته و با هم مقایسه شده است.

۲- مواد و روش تحقیق

برای ایجاد گاز و فومشدن فلز زمینه، از پودر TiH₂ با اندازهٔ متوسط ۲۵ میکرومتر و پودر CaCO₃ با اندازهٔ متوسط ۱۰ میکرومتر استفاده شده است که تصویر SEM آنها در شکل (۱) ارائه شده است. فرآیند فومشدن توسط ذرات CaCO₃ و TiH₂ به روش ریخته گری به شرح زیر انجام شد:

ابتدا شمش آلیاژ آلومینیم A356 با ترکیب شیمیایی مندرج در جدول (۱) در کوره القایی ذوب شد. سپس ذرات پدیدآورندهٔ گاز TiH2 به مقدار ۲–۱ درصد وزنی و در سه دمای ۶۵۰، ۷۰۰ و ۷۵۰ درجهٔ سانتی گراد به مذاب اضافه شد. مخلوط مذاب و ذرات ۲iH2 به مدت ۶۰ ثانیه توسط یک همزن گرافیتی با سرعت ۴۶۰ دور بر دقیقه همزده شد تا توزیع مناسبی از ذرات پدیدآورندهٔ گاز در مذاب به دست آید. پس از آن، مذاب در زمانهای ۳۰ ثانیه تا ۱۲۰ ثانیه (۲ دقیقه) در دماهای ۶۵۰، ۰۰۰ و ۷۵۰ درجهٔ سانتی گراد نگهداری شد تا فرایند فومشدن کامل شود. سپس قالب از درون کوره بیرون

فرایند فومشدن توسط CaCO₃ هم به طور جداگانه مشابه TiH₂ انجام شد. با این تفاوت که مقدار ذرات پدیدآورندهٔ گاز CaCO₃ برابر ۲/۵–۲/۵ درصد وزنی در دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد به مذاب اضافه شده و در همین دما به مدت زمانهای ۱۲۰ الی ۶۰۰ ثانیه همزده شد و سپس به مدت زمانهای ۱۲۰ و ۲۰ دقیقه در این دما در کوره نگهداری شد تا فرایند فومشدن اتفاق افتاده و کامل شود. در نهایت قالب از داخل کوره بیرون آورده و نمونهها در محیط سرد شدند. برای ارزیابی چگالی، ساختار سلولی و عیوب در نمونههای فوم شده، بلوکهای مکعبی شکل از نمونه فومشده مختلف،

بریده شدند. شکل سلولها بهطور چشمی مشاهده و ابعاد آنها با استفاده از نرمافزار آنالیز تصاویر با ارزیابی حداقل ۲۰ سلول اندازه گیری شد. همچنین چگالی نمونهها با استفاده از نسبت وزن به حجم آنها بدست آمد. عیوب زهکشی و بههم پیوستگی سلولها بررسی و توزیع اندازهٔ سلول و انحراف معیار آن بدست آمد تا میزان ناهمگنی ساختار سلولی نمونه، مشخص شود.



HV: 15.00 KV DATE: 07/11/07 10 μm Vega @Tescan شکل ۱- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ترکیبات فومکننده: (الف) ترکیب 2TiH و ب)

A356 و ترکیب شیمیایی	آلياژ آلومينيم	محدوده استاندارد	جدول ۱- ه
حسب درصد وزنی).	ن تحقيق (بر -	مورد استفاده در ای	آلياژ

Ti	Cu	Mn	Zn	Mg	Si	Al	عنصر	
۰/۱۵	•/18	• / ١	•/•٨	٠/۴	٧	باقيمانده	A356	
حداکثر ۰/۲۵	حداکثر ۰/۲	حداکثر ۰/۱	حداکثر ۰/۱	•/٢ •/۴	۶/۵ ۷/۵	باقيمانده	استاندارد	

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی فوم شدن و مشخصات آن

در جدولهای (۲) و (۳) به ترتیب، نتایج ارزیابیهای نمونههای تولید شده توسط دو مادهٔ پدیدآورندهٔ گاز Til2 و CaCO3 آمده است. چگالی بدست آمده برای نمونههای فومشده توسط ۲۵۵3 در محدودهٔ ۲٫۸–۳٫۲ با مقادیر متوسط اندازهٔ سلول ۲٫۱۳۳–۱٫۵ و چگالی نمونههای فوم شده توسط ۲۰۱۲ بین ۲٫۸–۲٫۲ و چگالی نمونههای فوم شده توسط ۲۰۱۲ بین ۵٫۰ فوم شده توسط ۱۰۲ (۲٫۳ mm و ۲٫۷ سلول ۳٫۳ ۳٫۳–۲٫۴ است. همان طور که در جدولهای (۲) و (۳) مشاهده می شود، تعداد ۱۱ نمونه از نمونههای تولید شده توسط ۲۰۱۲ و نمونههای شماره ۲۸ و ۳۱ در نمونههای تولید شده توسط ۲۵۵۵ فوم نشدند. علت فوم نشدن این نمونهها، زمان نگهداری ناکافی در دمای فوم شدن و یا زمان نگهداری بیش از حد در نمونههای ۲۱۲ و همچنین زمان مهرزدن زیاد، در برخی نمونههای ۲۵۲۵ است. ف م ت کاف به ذات فیم شنده با مآناد در به تا د

فرصت کافی به ذرات فوم شونده برای آزادشدن و تولید فوم داده نشود و بهطور عکس، زمان نگهداری زیاد، موجب فومشدن بیش از حد و بزرگشدن سلولها و سرانجام متلاشی شدن آنها و خروج گازهای تولیدی از نمونه شود. از طرف دیگر، زمان همزدن زیاد، موجب می شود که ذرات فومشونده، زودتر تجزیه شده و گازهای تولیدی از نمونه خارج شوند.

۲-۲- بررسی عیب زهکشی

برای بررسی عیب زهکشی نمونهٔ فومشده، اثر زمان همزدن ۲ و ۴ دقیقه در نمونهٔ با ۳ درصد وزنی CaCO₃ بررسی شده است که تصویر نمونه در شکل (۲)، نشان داده شده است. با مقایسهٔ آنها مشاهده میشود که مقدار ناحیهٔ فوم نشده در قسمت پایینی نمونه برای زمان همزدن ۲ دقیقه (شکل ۲-الف)، از زمان همزدن ۴ دقیقه (شکل ۲-ب) بیشتر بوده و الف)، از زمان همزدن ۴ دقیقه (شکل ۲-ب) بیشتر بوده و ان میزان انبساط فوم، کاسته شد. از اینجا میتوان نتیجه گیری نمود که توزیع همگن ذرات پدیدآورندهٔ گاز و زمان نگهداری مناسب در دمای فومشدن، از مهمترین متغیرهای فوم کردن فلزات بوده و موجب میشود عیب زهکشی در فومها بوجود نیاید.

زهکشی، جاری شدن فلز مذاب از دیوارههای سلولی به درون لبههای سلول است که در نتیجه، نیروی وزن از لبههای سلول به سمت پایین است. نتیجه این فرآیند، تشکیل یک

متغير وابسته يا شاخص ارزبابي شده (متغير ياسخ)						متغبر مستقا		متغبر		
انحراف معيار (mm)	ے، حداقل اندازہ سلول (mm)	داکثر اندازه سلول (mm)	متوسط اندازه سلول (mm)	درصد تخلخل	چگالی (gr/cm ³)	وضعیت فومشدن	ی زمان نگەداری	دمای فومشدن (°C)	درصد TiH2	شمارهٔ نمونه
-	-	-	-	-	-	فوم نشد	۳۰ ثانیه	۶۵۰	١	١
٣٫٢۴	۰٫۹	۶٫٣	۲,۱۵	۳۶٫۳	۲۷٫۱	فوم شد	۱ دقیقه	۶۵۰	١	٢
۳٫۷۷	• ,Y	٩٫۵	۳,۶۵	۴۳٫۳	۱٬۵۳	فوم شد	۲ دقیقه	۶۵۰	١	٣
۳,۶۲	۰ _/ ۵	Α,Δ	۴٫۱	40,19	۱,۴۸	فوم شد	۳۰ ثانیه	٧٠٠	١	۴
٣٫١٣	۰ _/ ۵	۱۰٫۱	۴,۳۶	۵۵٬۵	۲٫۲	فوم شد	۱ دقیقه	٧٠٠	١	۵
-	-	-	-	-	-	فوم نشد	۲ دقیقه	٧٠٠	١	۶
۳,۶۶	٢,١	٩	۴,۲۵	۵۸,۱۵	۳۲,۱۳	فوم شد	۳۰ ثانیه	۷۵۰	١	۷
۳,۵۳	١	۸, ۱۰	۵,۱۶	84,4	۰ ٫۹۶	فوم شد	۱ دقیقه	۷۵۰	١	٨
-	-	-	-	-	-	فوم نشد	۲ دقیقه	۷۵۰	١	٩
-	-	-	-	-	-	فوم نشد	۳۰ ثانیه	۶۵۰	۱/۵	١٠
۳٫۱۰	۰٫۹	۱۰٫۴	۵٫۷	۵۴٫۸۱	۲۲٫۱	فوم شد	۱ دقیقه	۶۵۰	۱/۵	11
٣٬٠۴	۰ _/ ۵	۱۱٫۶	۵٫۹	۵۷٬۴۱	۱,۱۵	فوم شد	۲ دقیقه	۶۵۰	۱/۵	١٢
٣٫٢٣	١٫٣	A,Y	۴٫۸	۵۰٫۳۷	۱٫۳۴	فوم شد	۳۰ ثانیه	٧٠٠	۱/۵	۱۳
۲٫۹۶	۶ _۱ ۶	11	۶,۱۴	۶.	۱٬۰۸	فوم شد	۱ دقیقه	٧٠٠	۱/۵	14
-	-	-	-	-	-	فوم نشد	۲ دقیقه	٧٠٠	۱/۵	۱۵
۳٬۵۶	۱٫۵	١٠٫٧	۴,۶	۶۱٫۱۱	۱٬۰۵	فوم شد	۳۰ ثانیه	۷۵۰	۱/۵	18
-	-	-	-	-	-	فوم نشد	۱ دقیقه	۷۵۰	۱/۵	۱۷
-	-	-	-	-	-	فوم نشد	۲ دقیقه	۷۵۰	۱/۵	۱۸
٣٫٣٧	١٫۴	٩٫١	۵٫۴	۵۷٬۴	۱,۱۵	فوم شد	۳۰ ثانیه	۶۵۰	٢	١٩
٣,١۵	٢,١	11	۶,۲	۶۴٫۸	۰٫۹۵	فوم شد	۱ دقیقه	۶۵۰	٢	۲۰
۳,۶۴	۸,∙	۱۱٫۳	۷٫۱	۶۷٫۴	۸۸٬۰	فوم شد	۲ دقیقه	۶۵۰	٢	۲۱
٣,۴٢	۲,۳	٨,۶	Y	84,4	۰ ٫۹۶	فوم شد	۳۰ ثانیه	٧٠٠	٢	۲۲
۳٫۲۱	۱٫۵	17/1	۷٫۳	۷۰٬۳۷	• ,A	فوم شد	۱ دقیقه	٧٠٠	٢	۲۳
-	-	-	-	-	-	فوم نشد	۲ دقیقه	٧٠٠	٢	74
-	-	-	-	-	-	فوم نشد	۳۰ ثانیه	۷۵۰	٢	۲۵
-	-	-	-	-	-	فوم نشد	۱ دقیقه	۷۵۰	٢	78
-	-	-	-	-	-	فوم نشد	۲ دقیقه	۷۵۰	٢	۲۷

جدول ۲- وضعیت نمونههای تولیدشده توسط TiH₂ در زمان همزدن ۱ دقیقه

جدول ۳- وضعیت نمونههای تولیدشده توسط CaCO₃ در دمای فومشدن ۷۰۰ درجه سانتیگراد

متغير وابسته يا شاخص ارزيابي شده (متغير پاسخ)							متغير مستقل			متغير
انحراف معيار (mm)	حداقل اندازه سلول (mm)	حداکثر اندازه سلول (mm)	متوسط اندازہ سلول (mm)	درصد تخلخل	چگالی (gr/cm ³)	وضعیت فومشدن	زمان نگەدارى (دقيقە)	زمان همزدن (دقیقه)	درصد CaCO ₃	شمارهٔ نمونه
-	-	-	-	-	-	فوم نشد	۲۰	۱.	۲/۵	۲۸
۰٫۹۷	۲,٠	۵,۹	۱,۲۶	۵۸٬۵۲	1,17	فوم شد	۲.	۵	۲/۵	۲۹
۰٬۸۷	٠٫٣	٣,۶	۱٫۵	۵۸٬۵۶	۲٫۲	فوم شد	١٠	۴	۲/۵	۳۰
-	-	-	-	-	-	فوم نشد	١٠	۱.	٣	۳۱
۰,۹۲	۰٫۲۵	٣,٩	۱٫۹	۸۲٬۹۶	•,۴۶	فوم شد	١٠	۵	٣	۳۲
• ٬۷۳	• ،۵	۴٫۵	۲٫٣	۸۸,۱۵	۲۳٫	فوم شد	١٠	۴	٣	۳۳
۱٬۰۵	۲,٠	۶,۰	۲٫۸	Y1/11	۸۷٫۰	فوم شد	١٠	۵	٣/۵	37
۱,۲۶	١٫٣	۶,۲	٣٫١	۸۰,۷۴	• ،۵۲	فوم شد	١٠	۴	٣/۵	۳۵
۱,۱۶	• , Y	۶,۱	۲٫۲	۶۷٫۷۸	• ،۸۷	فوم شد	١٠	٢	٣/۵	۳۶

Archive of SID



شکل ۲- تصاویر نوری از ناحیهٔ فومنشده در قسمت پایین قالب در دو زمان همزدن: الف) ۲ دقیقه، ب) ۴ دقیقه تولید شده با استفاده از ۳ درصد وزنی CaCO₃. (بزرگنمایی هر دو تصویر یکسان است)

لایهٔ ضخیم از فلز در پایین نمونه است. برای این که زهکشی اتفاق نیفتد و یا به حداقل برسد، باید ویسکوزیتهٔ مذاب مناسب باشد. ویسکوزیتهٔ کم نه تنها باعث زهکشی فوم میشود، بلکه موجب خروج گاز، قبل از فرآیند فومشدن میشود و در نتیجه ساختاری با تخلخل کمتر، ایجاد میشود [۱۹،۱]. دو حباب کنار هم، توسط یک فیلم مذاب از هم جدا میشوند. مذاب موجود در فیلم، تمایل دارد در نتیجهٔ تنش سطحی سیلان کند. اگر سیلان فیلم مذاب، از هم جدا رگاز (برای ۲H2 حدود ۵/۱–۵/۰ درصد وزنی و توسط مقدار گاز (برای ۲H2 حدود ۵/۱–۵/۵ درصد وزنی و مییابد[۵۰/۲۹]. بنابراین برای پایداری یک فوم، مذابی با مییابد[۵۰/۲۹]. بنابراین برای پایداری یک فوم، مذابی با ویسکوزیتهٔ کافی مورد نیاز است تا حبابها در اثر سیلان بیش از حد مذاب، متلاشی نشوند.

لازم به ذکر است که زمان نگهداری، سرعت همزدن، شکل قالب و همزن هم در پدیدهٔ زهکشی و ایجاد این لایهٔ بدون حباب در پایین قطعه، اثرگذار هستند. زمان نگهداری مناسب و سرعت همزدن بالا میتواند فرآیند زهکشی را کند کرده و به باقی ماندن حبابها کمک نماید که سبب تولید فومهایی با تخلخل بالاتر میشود[۴،۱]. در اثر زهکشی فلز مذاب در طی انجماد مذاب فوم، اندازه سلول و چگالی نسبی در طول یک نمونه تغییر میکند[۲۰].

در تحقیقات انجام شده توسط دیگران بیان شده است که وجود ٪۲۰–۵ وزنی ذرات نامحلول مانند SiC یا SI2O3 ویسکوزیتهٔ مذاب آلومینیم را افزایش داده و مانع زهکشی در شاخههای حبابها شده و فوم را پایدار میسازد[۱۲،۱]. در این تحقیق، برای پایداری نمونههای فومشده از یک سیستم آلیاژی Al-Si-Mg به همراه ترکیبات بینفلزی میشازی جامد (مانند Al-Si-Mg) در مذاب میشود. این بینفلزی جامد (مانند Mg₂Si) در مذاب میشود. این زهکشی و جاریشدن مذاب به سمت پایین نمونه زهکشی و جاریشدن مذاب به سمت پایین نمونه میشوند[۱۰۶]. هر چند که به منظور بررسی دقیقتر این پدیده، لازم است که تحقیقات بیشتری دربارهٔ چگونگی مکانیزم اثر رسوبات بینفلزی در پایداری فوم انجام شود.

٣-٣- بررسى عيب بەھم پيوستن سلول ها

برای بررسی عیب بههمپیوستن سلولها، ساختار فوم آلومینیم با ۱/۵ درصد وزنی TiH₂ در دماهای ۶۵۰، ۷۰۰ و ۷۵۰ درجهٔ سانتی گراد به صورت نمونه بررسی شده است که در شکل (۳) نشان داده شده است. بر اساس شکلهای (۳–الف) و (۳–ب) مشاهده میشود که فومهای تولید شده در دماهای ۶۵۰ و ۷۰۰ درجهٔ سانتی گراد دارای عیوب کمتری هستند. در حالی که فومهای تولیدشده در دمای کمتری هستند. در حالی که فومهای تولیدشده در دمای داشته و عیوب زیادی در آنها مشاهده شد. بنابراین بهنظر میرسد که برخلاف زهکشی، دمای فومشدن اثر قابل توجهی بر بههم پیوستن سلولها دارد که با مطالعات قبلی همخوانی دارد[۱۶،۱۲].



شکل ۳- تصاویر میکروسکوپی از ایجاد عیب بههمپیوستن سلولها در ساختار فوم آلومینیم با ۱٫۵ درصد وزنی TiH₂ در دماهای: الف)۶۵۰، ب)۷۰۰ و ج)۷۵۰ درجه سانتیگراد

www.SID.ir

شکل (۴)، بههم پیوستن سلولها در فومهای تولیدشده توسط ۲٫۵ ۳ و ۲٫۵ درصد وزنی CaCO3 را نشان می دهد. مشاهده می شود که عیوب موجود در فومهای تولیدشده توسط ۲٫۵ و ۲٫۵ درصد وزنی کم تر است. عیوبی مانند پارگی دیوارهٔ سلولی و بههم پیوستن سلولها و درشت شدن اندازهٔ آنها، توسط مستطیلهایی مشخص شدهاند که به خوبی مشاهده می شوند. تحقیقات قبلی انجام شده هم این نتایج را تایید کرده و نشان دادهاند که همواره برای حداقل شدن این عیب، مقدار مادهٔ پدیدآورندهٔ گاز بهینه ای (به طور این عیب، مقدار مادهٔ پدیدآورندهٔ گاز بهینه ای (به طور فوم شدن)، مورد نیاز است[۱۷،۱۵] که در این تحقیق برای فرات CaCO3 مقدار ۲٫۵ درصد وزنی است.

در شکل (۵)، ساختار نمونهٔ فومشده توسط ۲٫۵ درصد وزنی CaCO3 با زمان همزدن ۲ دقیقه و زمان نگهداری ۱۰ دقیقه نشان داده شده است. مشاهده می شود که در مکانهایی که با مستطیل نشان داده شده است، اندازهٔ حفرات نسبت به بقیهٔ نمونه بزرگتر هستند و ادغام سلولها انجام شده است. زمان همزدن کم، موجب عدم اختلاط مناسب ذرات دمCO3 در مذاب می شود. در نتیجه مکانهای جوانهزنی حفرات در درون مذاب، به خوبی پخش نشده و در ناحیهای تجمع ذرات CaCO3 و در ناحیهٔ دیگر، عدم وجود ذرات مشاهده می شود. بنابراین ساختار فوم بدست آمده، دارای اندازهٔ حفرات متغیری است که ممکن است در برخی قسمتها، خیلی بزرگ بوده و یا در قسمتهایی از فوم، هیچ حفرهای موجود نباشد[۲۱،۳۰۱]. وجود این ناهمگنی در

فومها، موجب کاهش خواص مکانیکی آنها شده و شکست از همین نواحی شروع می شود[۲۲،۲۱]. مقایسهای بین فومهای بدست آمده از CaCO₃ و TiH

نشان میدهد که در فومهای بدست آمده از CaCO3، یک مکانیزم پایدارکنندهٔ سلول وجود دارد که فرآیند پارگی سلولها را کند کرده و بنابراین از بههم پیوستن سلولها و درشت شدن آنها جلوگیری مینماید. این مکانیزم ناشی از برهم کنش مذاب با گاز CO2 در طول فرآیند فومشدن است[۱۳]. به طور کلی، هر چه عیوب کمتری در فوم وجود داشته باشد، آن فوم دارای خواص مکانیکی همگنتری است.

متلاشی شدن هنگامی اتفاق میافتد که دو سلول یکی شده و سلول بزرگتری را تشکیل دهند. به نظر میرسد که پاره شدن سلولها، دلیل چنین فرآیندی است. چون شاخههای فلزی، قابلیت کشیدگی ندارند و همین که ضخامت آنها از یک حد بحرانی کمتر شد، پاره میشوند[۲۲،۱].

بههم پیوستن سلولها و در نتیجه پارگی دیوارهٔ آنها، یک فرآیند مکانیکی است که به پایداری مکانیکی غشاء آنها بستگی دارد. این یک خاصیت استاتیکی است و اگر نوسان موضعی ضخامت فیلم سبب نازکشدن موضعی سریعتر آن شود (به دلیل عدم جبران به وسیله نیروهای جایگزین)، پاره میشود. نیروهای فیزیکی بین دو سطح فیلم، مانند واندروالس یا برهمکنشهای الکترومغناطیسی، فقط برای فیلمهای خیلی نازک (کوچکتر از ۱۹۳۱) صدق میکنند. برای فیلمهای ضخیمتر (مانند فومهای فلزی)، دو اثر وجود



شکل ۴– بههم پیوستن سلولها در فومهای تولیدشده توسط: الف/۲٫۵، ب)۳ و ج)۸۵ درصد وزنی CaCO₃ درصد



شکل ۵- نواحی معیوب در نمونهٔ فوم شده توسط ۳/۵ درصد وزنی CaCO₃ با زمان همزدن ۲ دقیقه و زمان نگهداری ۱۰ دقیقه.

دارد که ممکن است سبب تغییرشکل الاستیک شوند. در اثر گیبس، نازک شدن موضعی غشاء، سبب نازکشدن موضعی سطح میشود. در نتیجه، انرژی سطحی در این نقطه افزایش یافته و سبب ایجاد یک نیروی جبران کننده میشود. اثر ماراگونی هم بیان میکند که یک گرادیان از انرژی سطحی موجب جاری شدن فیلم نازک سطحی در جهت غلظت کمتر میشود[۲۴،۲۳،۱].

۴-۳- بررسی عیب ناهمگنی اندازهٔ سلول

برای محاسبهٔ میزان عیوب موجود در فوم (شامل متلاشی شدن سلولها و بههمپیوستن آنها) از میزان ناهمگنی در اندازهٔ سلول (انحراف معیار اندازهٔ سلول) استفاده شده است. در جدول (۳)، مقادیر انحراف معیار برای سه نمونهٔ فوم شده توسط ذرات CaCO3 آمده است. به این منظور، ابتدا سطح مشخصی از فوم انتخاب شد. سپس مقادیر اندازهٔ سلول موجود در این سطح توسط نرمافزار پردازش تصویر، اندازه گیری و ثبت شده و در نهایت، مقادیر انحراف معیار اندازه گیری و ثبت شده و در نهایت، مقادیر انحراف معیار و به صفر نزدیکتر باشد، میزان همگنی آن فوم، بهتر بوده و عیوب آن کمتر است. بنابراین با توجه به جدول (۳) مشاهده میشود که ساختار فوم تولید شده با ۳ درصد وزنی مشاهده میشود که ساختار فوم تولید شده با ۳ درصد وزنی



سلول بدست آمده در فومهای تولیدشده با درصدهای مختلف TiH2 همراه با انحراف معیار آنها، آمده است. همانطور که مشاهده میشود، کمترین مقدار انحراف معیار با مقدار ۲٫۹۶، مربوط به همگنترین فوم است یعنی فومی که توسط ۱٫۵ درصد وزنی TiH2 در دمای ۷۰۰ درجهٔ سانتیگراد با زمان نگهداری ۱ دقیقه، تولید شده است. هرچندکه در مقایسه با مادهٔ فومکنندهٔ CaCO3، دارای ناهمگنی و انحراف معیار بیشتری است. به عبارت دیگر، براساس آزمایشهای انجام شده در شرایط تعریف شده برای هر یک از افزودنیها، پراکندگی در اندازهٔ سلول با استفاده از CaCO3 خیلی کمتر از TiH2 است.

در شکل (۶)، ناهمگنی فومهای تولید شده توسط ۱, ۱/۵ و ۲ درصد وزنی TiH2 در دمای ۷۵۰ درجهٔ سانتی گراد و زمان نگهداری دو دقیقه، نشان داده شده است. مشاهده می شود که در هر سه نمونه، توزیع اندازهٔ حفرات به شدت ناهمگن است و در اثر تجمع ذرات TiH2 ناشی از عدم وجود زمان کافی برای همزدن، در برخی مناطق سلولهای بزرگی تشکیل شدهاند و در بعضی از قسمتها، هیچ حفرهای هم تشکیل نشده است که این مناطق توسط مستطیل در شکل (۶) مشخص شدهاند.

برای مقایسهٔ بهتر شکل سلولها و ناهمگنی آنها، ضخامت دیوارهٔ سلولها برای سلولهای با اندازهٔ مختلف در شکل (۷) نشان داده شده است. در فرایند فومشدن، ضخامت دیوارهها با رشد سلولها کاهش مییابد. هنگامی که دیوارههای مذاب برای نگهداری ساختار فوم خیلی ضعیف میشوند، فوم مذاب متلاشی میشود [۲۳،۱۳]. همانطور که در شکل (۸)



شکل ۶- ناهمگنی در فومهای تولید شده در دمای ۷۵۰ درجهٔ سانتیگراد و زمان نگهداری دو دقیقه توسط الف) ۱ ، ب) ۱٫۵ و ج) ۲ درصد وزنی TiH₂

مشاهده میشود، در فومهای CaCO₃ ضخامت دیوارهٔ سلول به طور میانگین برابر mm /۰ بوده که تقریبا ۵ برابر نسبت TiH₂ کمتر است (با ضخامت دیوارهٔ میانگین mm ۱). این موضوع نشان میدهد که ترکیبات بینفلزی Al-Ca که پایدارکنندهٔ حبابها در مذاب هستند به مقدار بیشتری در مذاب وجود داشته و از پارگی دیوارهٔ حبابها جلوگیری کردهاند. همچنین با توجه به اندازهٔ سلول کوچکتر در CaCO₃، نتیجه گیری میشود که ذرات CaCO₃ توزیع همگنتری نسبت به TiH₂ در مذاب داشته، ذرات بین فلزی Al-Ca مانع رشد بیش از حد سلولها شده، در نتیجه حبابهای تشکیل شده، در زمان کمتری به هم رسیده و سلولهای کوچکتر ولی با ضخامت دیوارهٔ کمتر، تشکیل میدهند.



شکل ۸– مقایسهٔ ضخامت دیوارهٔ سلول آلومینیم فومشده توسط TiH2 و CaCO3

۴- نتیجهگیری

- ۱- با استفاده از عوامل فومیساز 2Hi و CaCO و بدون استفاده از ذرات پایدار کنندهٔ سلولها، میتوان فومهای مطلوب با ساختار سلولی همگن از آلیاژهای Al-Si-Mg تولید نمود.
- ۲- تولید فوم مطلوب با استفاده از ترکیبات CaCO3، با اضافه کردن ۳ درصد وزنی از آن در دمای فومشدن
 ۲۰۰ درجهٔ سانتی گراد، زمان نگهداری ۱۰ دقیقه و زمان همزدن ۴ دقیقه بدست آمده است.
- ۳- تولید فوم مطلوب با استفاده از ترکیبات TiH2، با اضافه کردن ۱/۵ درصد وزنی از آن در دمای فومشدن
 ۷۰۰ درجهٔ سانتی گراد، زمان نگهداری ۱ دقیقه و زمان همزدن ۱ دقیقه بدست آمده است.

۴- در هر دو روش تولید فوم با TiH2 و CaCO3، با افزایش زمان نگهداری میزان عیوب زهکشی و بههم پیوستن سلولها افزایش مییابد.

 ۵- در نمونههای فومشده توسط TiH2 با افزایش دمای فومشدن و در نمونههای فومشده توسط CaCO₃، با
کاهش زمان همزدن، میزان عیوب زهکشی و بههم پیوستن سلولها افزایش مییابد.

مراجع

- Degischer H.P., Kriszt B., Handbook of Cellular Metals: Production, Processing, Applications, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., 2002.
- [2] Ashby M.F., Evans A.G., Fleck N.A., Gibson L.J., Hutchinson J.W., Wailey H.N.G., Metal Foams: A Design Guide, Butterworth-Heinemann, 2000.
- [3] Yang C.C., Nakae H., Foaming characteristic control during production of aluminium alloy foam, Journal of Alloys and Compounds, 2000, 313, 188-191.
- [4] Byakova A., Kartuzov I., Nakamura T., Gnyloskurenko S., The role of foaming agent and processing route in mechanical performance of fabricated aluminum foams, Procedia Materials Science, 2014, 4, 109–114.
- [5] Yang C.C., Nakae H., The effects of viscosity and cooling conditions on the foamability of aluminum alloy, Journal of Materials Processing Technology, 2003, 141, 202-206,
- [6] Ma L., Song Z., Cellular structure control of aluminum foams during foaming process of aluminum melt, Scripta Materialia, 1998, 39(11) 1523–1528.
- [7] Wang N., Maire E., Chen X., Adrien J., Li Y., Amani Y., Hu L., Cheng Y., Compressive performance and deformation mechanism of the dynamic gas injection aluminum foams, Materials Characterization, 2019, 147, 11-20.
- [8] Gergely V., Clyne T.W., Drainage in standing liquid metal foams modelling and experimental observations, Acta Materialia, 2004, 52, 3047–3058.
- [9] Deqing W., Ziyuan Sh., Effects of ceramic particles on cell size and wall thickness of aluminum foam, Materials Science and Engineering A, 2003, 361, 45-49.
- [10] Kahani J., Bazzaz S., Moghaddasi F., Kahani A., A study of fabricating and compressive properties of cellular Al–Si (355.0) foam using TiH₂, Materials and Design, 2014, 55, 792–797.
- [11] Wubben T., Odenbach S., Stabilization of liquid metallic foams by solid particles, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2005, 266, 207-213.
- [12] Deqing W., Xiangjun M., Weiwei X., Ziyuan S., Effect of processing parameters on cell structure of an aluminum foam, Materials Science and Engineering A, 2006, 420, 235–239.
- [13] Nayebi B., Mehrabian M., Shahedi-Asl M., Shokouhimehr M., Nanostructural approach to the thickening behavior and oxidation of calciumstabilized aluminum foams, Materials Chemistry and Physics, 2018, 220, 351-359.

- [14] Wang N., Maire E, Cheng Y., Amani Y., XiangLi Y., Adrien J., Chen J., Comparison of aluminium foams prepared by different methods using X-ray tomography, Materials Characterization, 2018, 138, 296-307.
- [15] Mukherjee M., García-Moreno F., Jiménez C., Rack A., Banhart J., Microporosity in aluminium foams, Acta Materialia, 2017, 131, 156-168.
- [16] Situ D.H., Tensile Response of SiC Reinforced Al Based Foam Material, Master Thesis, University of Toronto, 1998.
- [17] Hangai Y., Takada K., Fujii H., Aoki Y., Utsonomiya T., Foaming behavior of blowing and stabilizationagent-free aluminum foam precursor during spot friction stir welding, Journal of Materials Processing Technology, 2019, 265, 185-190
- [18] Kenesei P., Kadar Cs., Rajkovits Zs., Lendvai J., The influence of cell-size distribution on the plastic deformation in metal foams, Scripta Materialia, 2004, 50, 295-300.
- [19] Duarte I., Banhart J., A study of aluminium foam formation-kinetics and microstructure, Acta Materialia, 2000, 48, 2349–2362.
- [20] Gergely V., Curran D.C., Clyne T.W., The FOAMCARP process: Foaming of aluminium MMCs by the chalk-aluminium reaction in precursors, Composites Science and Technology, 2003, 63, 2301-2310.
- [21] Faxian Z., Haitao H., Zhancheng L., Guoliang D., Experimental study on liquid drainage characteristics of metal foams under sloshing conditions, International Journal of Refrigeration, 2019, 99, 351-362.
- [22] Garcia-Moreno F., Babcsan N., Banhart J., X-ray radioscopy of liquid metal foams: Influence of heating profile, atmosphere and pressure, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2005, 263, 290-294.
- [23] Heim K., García-Moreno F., Banhart J., Particle size and fraction required to stabilize aluminium alloy foams created by gas injection, Scripta Materialia, 2018, 153, 54-58.
- [24] Song Z.L., Zhu J.S., Ma L.Q., He D.P., Evolution of foamed aluminum structure in foaming process, Materials Science and Engineering A, 2001, 298, 137-143.