http://mechanics.journals.modares.ac.ir

مجله علمی پژوهشی
مهندسی مکانیک مدرس
دوره ۱۱ شماره ۲ تابستان ۱۳۹۰ ص‌ص ۶۷-۷۵

تاریخچه مقاله:
دریافت ۸۹/۱۲/۲۱
پذیرش ۹۰/۴/۱۷
ارائه در سایت ۹۰/۶/۱۶

مطالعهٔ شرایط فوم‌سازی در ساخت فوم تخلخل- بستهٔ آلومینیمی به‌روش نورد تجمعی با استفاده از عامل تخلخل‌ساز TiH_2

حجت‌اله فتحی[۱]، اسماعیل عمادالدین[۲*]، علی حبیب‌اله‌زاده[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مواد، دانشگاه سمنان، سمنان
۲- استادیار، گروه مهندسی مواد، دانشگاه سمنان، سمنان
۳- دانشیار، گروه مهندسی مواد، دانشگاه سمنان، سمنان
*سمنان، صندوق پستی ۳۵۱۳۱-۱۹۱۱. emadoddin@semnan.ac.ir

چکیده- در این پژوهش، فوم تخلخل بستهٔ آلومینیمی به روش نورد تجمعی با استفاده از عامل تخلخل‌ساز پودر هیدرید تیتانیم تولید و اثر دمای نهایی فوم‌سازی، زمان نهایی فوم‌سازی، نرخ گرمایشی و پاس‌های نورد بر درصد تخلخل‌های به‌دست آمده، مطالعه شد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش دما، به‌دلیل سست شدن زمینه، سازوکار فوم‌سازی تسریع می‌شود. همچنین افزایش پاس‌های نورد منجر به توزیع یکنواخت‌تر پودر شده و در نتیجه باعث افزایش درصد تخلخل در فوم نهایی می‌شود. بیشترین تخلخل در حدود ۴۱/۳٪ در دمای ۶۸۰°C به مدت ۵ دقیقه و با نرخ گرمایشی $10\frac{^\circ C}{s}$ به‌دست آمد.

کلید واژگان: فوم تخلخل بسته، هیدرید تیتانیم، دمای فوم‌سازی، زمان فوم‌سازی.

Investigation on Aluminum Closed Cell Foams through Accumulative Roll Bonding with TiH_2 as Blowing Agent

H. Fathi[1], E. Emadoddin[2*], A. Habibolahzadeh[3]

1- Master student of metallurgy engineering, University of Semnan,
2- Assistant Professor of Semnan University, semnan.
3- Associate Professor of Semnan University, semnan.
*P.O.B. 35131-1911, Semnan, Iran. emadoddin@semnan.ac.ir

Abstract- In this study, Aluminum closed-cell foam was produced through accumulative roll bonding using TiH_2 as blowing agent. Then, the effect of the number of rolling passes, foaming temperature, foaming time and heating rate on percent of porosity was investigated. The results indicate that foaming process improves with increasing temperature. The TiH_2 powder was uniformly dispersed into the matrix with increasing the number of roll passes and caused an increase of the percent of porosity. Finally, 41% of porosity at foaming temperature of 680°C, foaming time of 5 min and heating rate of $10\frac{^\circ C}{s}$ was produced.

Keywords: Closed-cell Foam, Titanium Hydride, Temperature of Foaming, Time of Foaming.

۱- مقدمه

فوم‌های فلزی و مواد با ساختار متخلخل به سبب داشتن ترکیبی از خواص فیزیکی و مکانیکی ویژه مانند سفتی بالا[1] با وزن کم یا قابلیت نفوذپذیری گاز با هدایت حرارتی بالا، موادی جذاب بوده و به‌دلیل ویژگی‌های منحصر به فردی مانند جذب انرژی، استحکام بالا [۱] و مقاومت الکتریکی [۲] کاربردهای ویژه‌ای در صنعت دارند. استفاده از فوم‌های فلزی در ساخت سلول‌های سوختی با بهره‌گیری از خاصیت افزایش دامنهٔ نفوذ [۳]، اتصال فلز به سرامیک [۴]، در صنایع نظامی [۵]، اتومبیل‌سازی، کشتی‌سازی، راه آهن، پزشکی و ورزشی کاربردهای جدیدی یافته‌اند [۶].

فوم‌های آلومینیمی به دو روش متالورژی پودر و روش ذوبی تهیه می‌شوند. روش ذوبی از نظر اقتصادی به صرفه‌تر بوده و قابلیت افزایش استحکام از طریق افزودن عناصر آلیاژی را دارد؛ اما روش متالورژی پودر قابلیت تولید فوم نزدیک به شکل نهایی را داشته و برای تولید قطعاتی با شکل پیچیده صرفهٔ اقتصادی ندارد[۷].

در کنار این دو روش تولید فوم، روش‌های شکلدهی نیز استفاده می‌شود که یکی از آن‌ها روش نورد تجمعی است. استفاده از فرایند نورد تجمعی در ساخت فوم تخلخل بسته، چند مزیت اساسی دارد. اول اینکه در ساخت فوم آلومینیمی به این روش، از مواد اولیه ارزان مانند ورق‌های آلومینیمی استفاده شده و لذا هزینه‌های تولید پودر فلز پایه و زینتر حذف می‌شود. دوم آنکه از فرایند ساده‌ای مانند نورد در تولید آن استفاده می‌شود و همچنین به‌دلیل آنکه فرایند ذوب یا تولید پودر فلز پایه در آن حذف شده، قابلیت استفاده برای طیف وسیعی از آلیاژهای مورد استفاده در صنعت را دارد.

در تحقیق حاضر، فوم تخلخل بسته آلومینیمی به روش نورد تجمعی تولید و اثر زمان، دما، نرخ گرمایشی و پاس‌های نورد بر درصد تخلخل نهایی بررسی شده است.

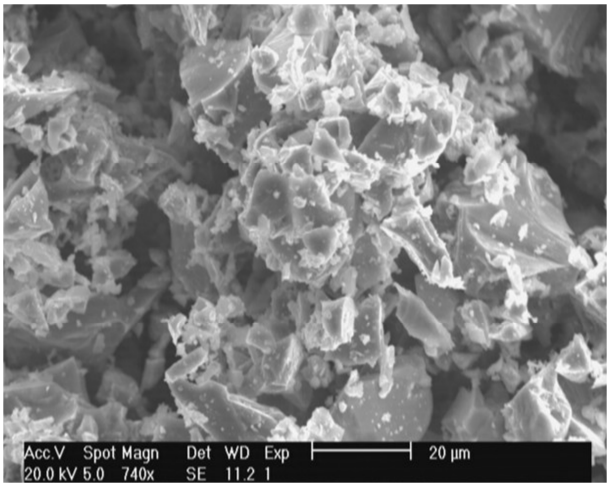
۲- روش تحقیق

ابتدا ورق آلومینیم A1050 با ضخامت ۳ میلی‌متر تهیه و توسط دستگاه برش برقی به تسمه‌هایی با پهنای ۳ و طول ۱۵ سانتی‌متر برش زده شد. تسمه‌های به‌دست آمده در کوره مقاومتی قرار داده شده و در دمای $350^{\circ}C$ به مدت ۱ ساعت در فشار اتمسفر معمولی آنیل شد. ورق‌های آلومینیمی با برس پلاستیکی شستشوی اولیه و سپس سطوح تماس ورق‌ها توسط استون شستشوی نهایی داده شد. در هنگام نورد باید ورق‌ها بر روی یکدیگر ثابت بوده و حرکتی نداشته باشند تا اتصال به خوبی بر قرار شود. بدین منظور چهار سوراخ توسط مته در چهار گوشهٔ ورق‌ها ایجاد شد و ورق‌ها توسط سیم مسی بر روی یکدیگر بدون حرکت ثابت شد (شکل ۱).

شکل ۱ ایجاد سوراخ توسط مته برای ثابت نگهداشتن ورق‌ها بر روی یکدیگر در فرایند نورد

سطوح ورق‌ها توسط برس فولادی با سرعت ثابت پولیش شد تا لایه‌های ناخالصی و اکسیدهای سطحی از بین رفته و سطح تماس ورق‌ها به‌منظور اتصال مناسبتر افزایش یابد. وجود ناخالصی در سطح تماس ورق‌ها باعث می‌شود که نیروی مورد نیاز برای اتصال اتم به اتم در سطح ورق‌ها افزایش یابد[۸]. ورق‌ها توسط ترازوای دقیق وزن شد و پودر هیدرید تیتانیم با اندازه ذرات حدود ۲۰ میکرون به میزان ٪۰/۵ وزنی بین ورق‌ها به طور کاملاً یکنواخت توزیع شد. اندازه ذرات پودر هیدرید تیتانیم و همچنین نحوهٔ توزیع یکنواخت آن‌ها از اهمیت اساسی برخوردار است. شکل و اندازه ذرات پودر هیدرید تیتانیم در شکل ۲ آورده شده است.

1. High stiffness



شکل ۲ تصویر میکروسکوپ الکترونی از ذرات هیدرید تیتانیم

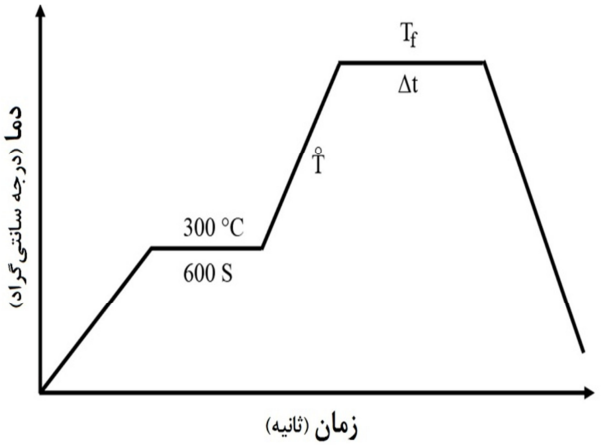
توزیع یکنواخت عامل تخلخل ساز بین ورق‌ها بسیار مهم است زیرا توزیع یکنواخت پودر هیدرید تیتانیم به‌طور مستقیم بر میزان تخلخل نهایی تأثیرگذار است. برای توزیع یکنواخت پودر از روش‌های مختلفی استفاده شد. در روشی موثر، یک توری با مش ۲۰۰ تهیه و با استفاده از آن، الکی آزمایشگاهی با دیوارهٔ فلزی ساخته شد تا بتوان با اعمال ضرباتی به دیوارهٔ فلزی، پودرها را به طور یکنواخت بر روی سطح ورق توزیع کرد.

سپس ورق آلومینیمی دیگری بر روی ورقی که پودر هیدرید تیتانیم بر روی آن توزیع شده، قرار داده شد و آنها به یکدیگر محکم شدند تا ورق‌ها بر روی یکدیگر لغزش نداشته باشند. کامپوزیت به‌دست آمده در دمای $200^{\circ}C$ به مدت ۵ دقیقه قرار داده شد [۹] و برای دستیابی به کرنش ۰/۸(معادلهٔ ۱) تا ٪۵۰ کاهش سطح مقطع توسط دستگاه نورد به آن اعمال شد و در نتیجه ورق ۱۵ سانتی‌متری به یک ورق دو لایه با طول حدود ۳۰ سانتی‌متر تبدیل شد. به‌منظور افزایش استحکام اتصال، ورق به‌دست آمده پس از پاس اول در دمای $200^{\circ}C$ به مدت ۱۰ دقیقه قرار داده شد که این دما پایین‌تر از دمای تبلور مجدد آلومینیم است [۱۰]. کرنش معادل از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید.

$$\bar{\varepsilon} = (2/\sqrt{3} \times Ln2) \times n = 0/8n \qquad (1)$$

که n مربوط به پاس‌های نورد است.

از ورق حاصل برای پاس‌های بعدی استفاده شد. بدین ترتیب که ورق مزبور به دو تکه برش زده شد و پس از انجام عملیات سطحی مانند مرحله اول، ورق‌ها بر روی یکدیگر ثابت شدند و بار دیگر تحت ٪۵۰ کاهش سطح مقطع قرار گرفتند. این فرایند تا ۶ پاس انجام شد. نتیجهٔ نهایی، دستیابی به ورقی است که ذرات هیدرید تیتانیم به طور کاملاً یکنواخت در آن توزیع شده‌اند. سپس ورق به‌دست آمده به‌منظور انجام فرایند فوم‌سازی به نمونه‌هایی با ابعاد ۲×۲ سانتی‌متر برش زده شد و نمونه‌های به‌دست آمده تحت زمان‌ها، دماها و نرخ‌های مختلف گرمایشی مورد آزمایش فوم‌سازی قرار گرفت. در مرحله فوم‌سازی نیاز به افزایش دما با سرعت بالا بود. بدین منظور از یک کوره استوانه‌ای استفاده شد تا بتوان نمونه‌ها را در طول محفظه استوانه‌ای در بازه زمانی مشخصی حرکت داد.



شکل ۳ منحنی دمایی مورد استفاده در مرحلهٔ فوم‌سازی

در فرایند فوم‌سازی از منحنی دمایی شکل ۳ استفاده شد. در این مرحله نمونه‌ها در دمای $300^{\circ}C$ به مدت ۶۰۰ ثانیه نگه‌داشته و سپس دما، با نرخ گرمایشی $\dot{T}$ تا رسیدن به T_f افزایش داده و نمونه‌ها در دمای T_f به‌صورت هم‌دما نگه‌داشته شد. نرخ‌های گرمایشی، دماها و زمان‌های مختلف مورد آزمایش قرار گرفت (جدول ۱).

جدول ۱ مقادیر مختلف نرخ گرمایشی ($\dot{T}$)، دمای فوم‌سازی (T_f) و زمان نگهداری در دمای نهایی (Δt) برای انجام فرایند فوم‌سازی Al/TiH_2

نرخ گرمایشی $(\frac{^\circ C}{s})$	دمای فوم‌سازی $(^\circ C)$	زمان فوم‌سازی (min)
۱۰	۶۴۰	۱
۱۰	۶۴۰	۵
۱۰	۶۶۰	۵
۱۰	۶۸۰	۲
۱۰	۶۸۰	۳
۵	۶۸۰	۵
۱۰	۶۸۰	۵
۲۰	۶۸۰	۵
۱۰	۶۸۰	۶
۱۰	۶۸۰	۷
۱۰	۷۰۰	۵

پس از فرایند فوم‌سازی نمونه‌های فومی توسط اصل ارشمیدس و با استفاده از رابطهٔ زیر به‌منظور تعیین درصد تخلخل، مورد اندازه گیری قرار گرفت.

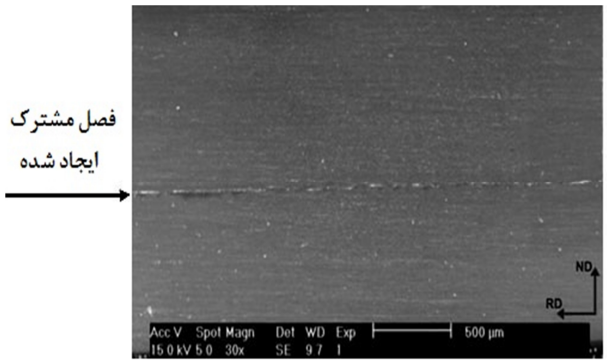
$$P=1-(\rho^*/\rho_s) \quad (۲)$$

ρ^* چگالی نمونهٔ متخلخل و ρ_s چگالی آلومینیم اولیه است.

۳- نتایج و بحث

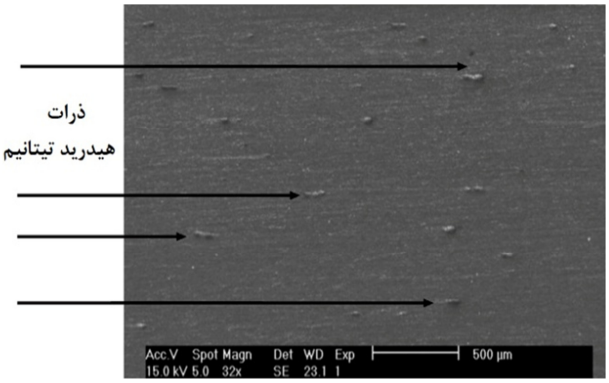
۳-۱- اثر پاس‌های نورد بر توزیع هیدرید تیتانیم

به‌منظور بررسی اتصال مناسب بین ورق‌ها در فرایند نورد تجمعی، پس از هر پاس مشاهدات میکروسکوپی انجام شد. شکل ۴ اتصال ایجاد شده پس از پاس اول را نشان می‌دهد. اتصال ایجاد شده به‌دلیل حضور ذرات هیدرید تیتانیم به‌خوبی قابل تشخیص است.



شکل ۴ فصل مشترک ایجاد شده پس از پاس اول

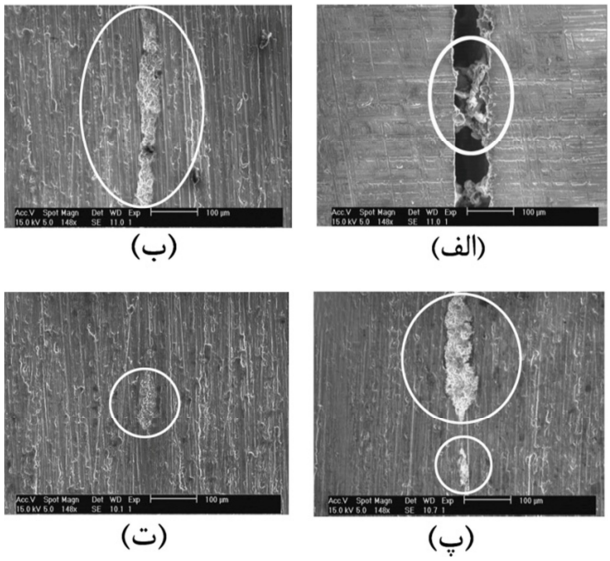
هر چه تعداد پاس‌های نورد افزایش می‌یابد، تشخیص اتصال‌های ایجاد شده به‌دلیل توزیع یکنواخت‌تر پودر هیدرید تیتانیم و نفوذ در زمینه مشکل‌تر شده و فصل مشترک ایجاد شده در پاس‌های اولیه، رفته رفته از بین می‌رود. شکل ۵ تصویر میکروسکوپ الکترونی را پس از پاس ششم نشان می‌دهد که در آن اتصال ایجاد شده قابل تشخیص نیست و زمینه کاملاً یکنواخت است؛ می‌توان نتیجه گرفت که توزیع یکنواخت ذرات پودر هیدرید تیتانیم در زمینه آلومینیمی حاصل شده است.



شکل ۵ از بین رفتن فصل مشترک اولیه پس از پاس ششم

در شکل ۶ تصویر میکروسکوپ الکترونی از فصل مشترک در پاس‌های مختلف نورد تجمعی مشاهده می‌شود. افزایش پاس‌های نورد به‌دلیل اعمال کرنش بالا باعث خرد و ریزتر شدن ذرات هیدرید تیتانیم می‌شود. همان‌طور که در این شکل با علائمی نشان داده شده، ذرات هیدرید تیتانیم در پاس‌های

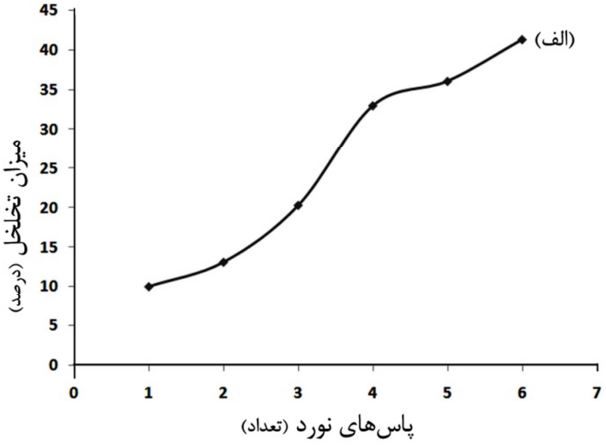
اولیه در فصل مشترک انباشته شده و با افزایش پاس‌های نورد، این انباشتگی کمتر می‌شود. می‌توان گفت که اتصال‌های ایجاد شده در پاس‌های بالاتر به‌دلیل از بین رفتن این انباشتگی، قویتر شده و در پاس ششم به دلیل دستیابی به توزیع یکنواخت ذرات بین لایه‌ها، اتصال قوی ایجاد می‌شود. با دستیابی به اتصال قوی بین لایه‌ها، ورق‌های آلومینیمی به یک نمونهٔ پیوستهٔ حجیم تبدیل می‌شود که ذرات هیدرید تیتانیم در داخل آن توزیع شده است.

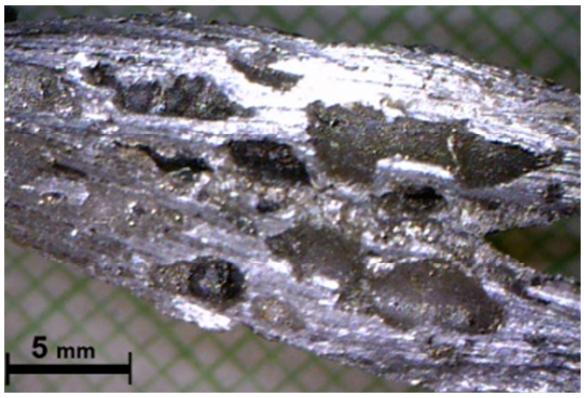


شکل ۶ تصویر میکروسکوپی از انباشتگی ذرات هیدرید تیتانیم در پاس الف) اول؛ ب) دوم؛ پ) سوم؛ ت) ششم

۳-۲- اثر پاس‌های نورد بر درصد تخلخل

شکل ۷ ارتباط پاس‌های نورد با درصد تخلخل را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش پاس‌های نورد، درصد تخلخل به‌دست آمده افزایش می‌یابد. افزایش پاس‌های نورد باعث افزایش کرنش اعمال شده به ورق‌ها و ذرات هیدرید تیتانیم شده و در نتیجه باعث خرد شدن ذرات و افزایش جایگاه آزادسازی گاز هیدروژن شده و در نتیجه در هنگام تجزیهٔ پودر هیدرید تیتانیم تخلخل ایجاد شده افزایش می‌یابد[۱۱]. همچنین افزایش پاس‌های نورد از به‌هم چسبیده شدن ذرات هیدرید تیتانیم به یکدیگر جلوگیری کرده و باعث افزایش فاصلهٔ ذرات شده و در نتیجه به افزایش جایگاه آزادسازی گاز هیدروژن منجر می‌شود.





شکل ۷ درصد تخلخل با پاس‌های نورد؛ دمای فوم‌سازی برابر ۶۸۰°C، نرخ گرمایشی برابر $۱۰\frac{°C}{s}$ و زمان فوم‌سازی برابر ۵ دقیقه

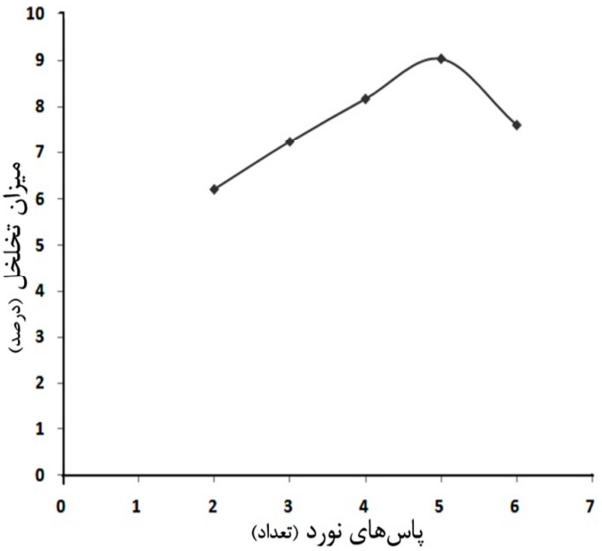
۳-۳- اثر دما، زمان و نرخ گرمایشی بر درصد تخلخل

در این تحقیق اثر دمای فوم‌سازی به‌عنوان پارامتری مهم بررسی شد. در گروه اول، نمونه‌ها در دمای ۳۰۰°C به‌مدت ۱ دقیقه قرار داده شد و دما با نرخ گرمایشی $۱۰\frac{°C}{s}$ تا رسیدن به دمای ۶۴۰°C افزایش داده و سپس تخلخل به‌دست آمده در نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. شکل ۸ درصد تخلخل به‌دست آمده در این شرایط را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، بیشترین تخلخل در دمای فوم‌سازی برابر ۶۴۰°C، نرخ گرمایشی برابر

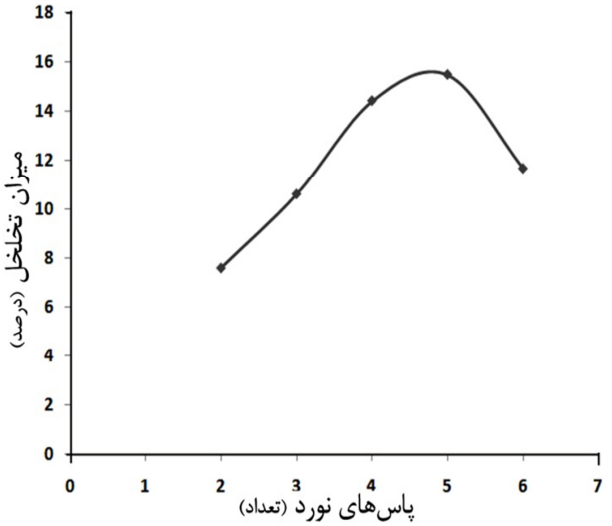
$۱۰\frac{°C}{s}$ و زمان فوم‌سازی برابر ۱ دقیقه، در حدود ٪۹ به‌دست آمد و در این شرایط، پس از پاس پنجم، درصد تخلخل کاهش یافت.

دلیل این پدیده آن است که با افزایش پاس‌های نورد، کرنش افزایش یافته و پس از پاس ششم، کرنش بالایی به ورق‌های آلومینیمی اعمال شده و لذا برای ایجاد انبساط بالا در زمینه، به دمای بالا نیاز خواهد بود. می‌توان چنین نتیجه گرفت که دمای نهایی فوم‌سازی پایین و انبساط ایجاد شده در زمینه در هنگام آزادسازی گاز بسیار کم بوده است. کرنش بالا منجر به افزایش استحکام ورق‌ها شده و استحکام ورق‌ها با افزایش پاس‌ها بیشتر می‌شود. در این حالت دو عامل با یکدیگر رقابت می‌کنند: یکی فشار گاز هیدروژن تولیدی بر اثر افزایش دما و دیگری کاهش استحکام نمونه‌ها به ازای افزایش دما. به نظر می‌رسد که شرایط پاس پنجم در این دما شرایط بهینه برای تولید گاز و تغییر شکل مناسب نمونه‌ها باشد. به بیانی دیگر در پاس ششم آنقدر استحکام نمونه‌ها زیاد بوده که گاز تولیدی نتوانسته است جا باز کند.



شکل ۸ درصد تخلخل با پاس‌های نورد؛ دمای فوم‌سازی برابر ۶۴۰°C، نرخ گرمایشی برابر $۱۰\frac{°C}{s}$ و زمان فوم‌سازی برابر ۱ دقیقه

نمونه‌های دیگری در دمای فوم‌سازی ۶۸۰°C با نرخ گرمایشی $۱۰\frac{°C}{s}$ و زمان فوم‌سازی ۲ دقیقه قرار داده شد تا اثر دما و زمان بیشتر بر میزان تخلخل بررسی شود. بیشترین تخلخل حاصل در این شرایط حدود ٪۱۶ است که در این حالت هم پس از پاس پنجم، یک افت در منحنی به وجود می‌آید (شکل ۹). با توجه به شکل فوق و افت در منحنی می‌توان دریافت که دما و زمان فوم‌سازی به دلایل گفته شده مناسب نبوده است.

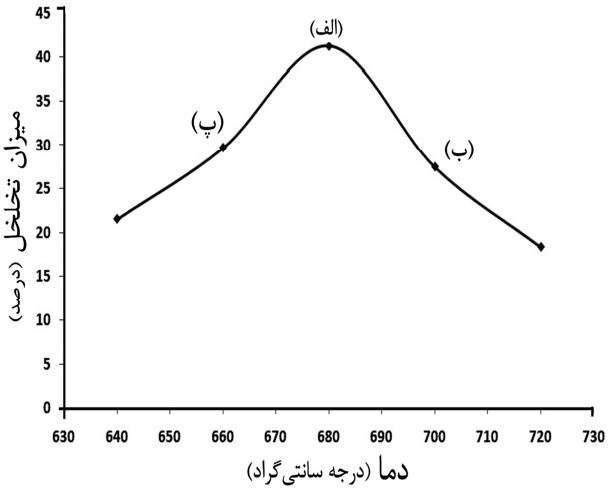


شکل ۹ درصد تخلخل با پاس‌های نورد؛ دمای فوم‌سازی برابر ۶۸۰°C، نرخ گرمایشی برابر $۱۰\frac{°C}{s}$ و زمان فوم‌سازی برابر ۲ دقیقه

نمونه‌های دیگری نیز در دمای فوم‌سازی ۶۸۰°C با نرخ گرمایشی $۱۰\frac{°C}{s}$ و زمان فوم‌سازی ۵ دقیقه قرار داده شد که بیشترین تخلخل حاصل حدود ٪۴۱/۳ بود (شکل ۷).

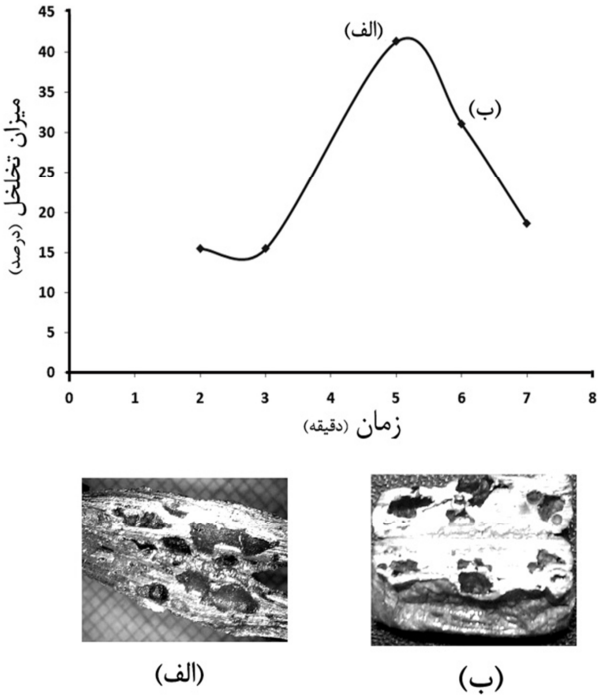
در شکل ۷ هیچ افتی در منحنی و کاهش تخلخلی دیده نمی‌شود. با توجه به این شکل می‌توان نتیجه گرفت که دما و زمان فوم‌سازی و در نتیجه انبساط ایجاد شده در زمینه برای ایجاد تخلخل مناسب بوده است. در مرحله بعدی، نمونه‌های دیگری در دماهای بالاتر یعنی ۷۰۰°C و ۷۲۰°C قرار داده و مشاهده شد که در دماهای بالاتر از ۶۸۰°C، احتمال ذوب

شدن موضعی نمونه‌ها زیاد بوده و بیشتر نمونه‌ها شکل خود را از دست می‌دادند و لذا درصد تخلخل به‌شدت کاهش یافت. با توجه به این مطالب، مقایسهٔ دمای فوم‌سازی در شکل ۱۰ آورده شده است.



شکل ۱۰ اثر دمای فوم‌سازی بر درصد تخلخل. پاس ششم، نرخ گرمایشی برابر $۱۰\frac{°C}{s}$ و زمان فوم‌سازی برابر ۵ دقیقه

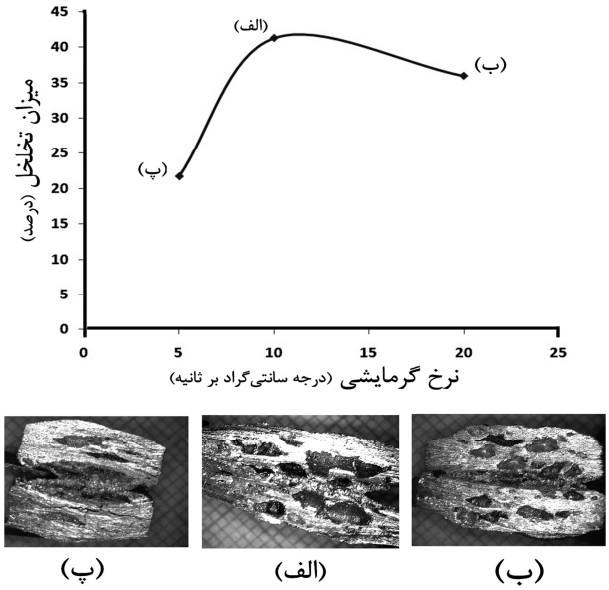
در این تحقیق، اثر زمان فوم‌سازی بر درصد تخلخل حاصل نیز بررسی شد که نتیجه آن در شکل ۱۱ آورده شده است. بیشترین تخلخل در زمان فوم‌سازی برابر ۵ دقیقه حاصل شد. در زمان‌های کمتر از ۵ دقیقه به‌دلیل بالا بودن استحکام و در نتیجه انبساط ناکافی زمینه، درصد تخلخل ایجاد شده کم است. در زمان‌های بیشتر از ۵ دقیقه به‌دلیل کاهش شدید استحکام و سست شدن زمینه، بسته شدن حفره‌ها رخ داده و در نتیجه درصد تخلخل نهایی کاهش می‌یابد.



شکل ۱۱ اثر زمان فوم‌سازی بر درصد تخلخل. پاس ششم، نرخ گرمایشی برابر $۱۰\frac{°C}{s}$ و دمای فوم‌سازی برابر $۶۸۰°C$

در این تحقیق همچنین اثر نرخ گرمایشی مطالعه شد که نتیجه در شکل ۱۲ آورده شده است. پس از آن که نمونه در دمای $۳۰۰°C$ نگه‌داشته شد، دما با نرخ‌های گرمایشی مختلفی افزایش داده شد که بیشترین تخلخل برای نرخ گرمایشی $۱۰\frac{°C}{s}$ به‌دست آمد. پودر هیدرید تیتانیم در دمای حدود $۴۶۵°c$ تجزیه می‌شود[۱۲] لذا در نرخ‌های گرمایشی پایین‌تر از $۱۰\frac{°C}{s}$، انبساط زمینه کافی نبوده و در نتیجه حفره‌های ایجاد شده بزرگ نخواهند شد. اما در نرخ‌های گرمایشی بالاتر از $۱۰\frac{°C}{s}$، سست شدن سریع زمینهٔ آلومینیمی و در نتیجه بسته شدن حفره‌ها رخ می‌دهد. به بیانی دیگر، در نرخ‌های گرمایشی پایین‌تر از $۱۰\frac{°C}{s}$، بازدهی تولید گاز کم بوده و سست شدن زمینه به‌کندی رخ می‌دهد و در نتیجه درصد تخلخل کاهش می‌یابد. در نرخ‌های گرمایشی بالاتر از $۱۰\frac{°C}{s}$ باز هم بازدهی تولید گاز کم است اما سست شدن زمینه به‌سرعت اتفاق افتاده

و حفره‌ها بسته شده و باعث فرار گاز هیدروژن از آن‌ها می‌شود که در نتیجه کاهش درصد تخلخل در فوم نهایی ایجاد می‌شود. با توجه به این مطالب و نتایج عملی به‌دست آمده، نرخ گرمایشی برابر $۱۰\frac{°C}{s}$، نرخ گرمایشی بهینه است.



شکل ۱۲ اثر نرخ گرمایشی بر درصد تخلخل

با توجه به شکل مربوط به فوم نهایی که در شرایط بهینه به‌دست آمد و در شکل ۱۲(الف) نشان داده شده، مشاهده می‌شود که دیوارهٔ سل‌ها صاف نبوده و یکنواختی خاصی در این دیواره‌ها مشاهده نمی‌شود. برای برطرف کردن این عیب می‌توان از پودر پیش گرم شدهٔ هیدرید تیتانیم در شرایط خاص استفاده کرد تا دیواره‌هایی صاف تولید می‌شود [۱۳].

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش فوم تخلخل بسته آلومینیمی با تخلخل حدود ۴۱/۳٪ و با به‌کارگیری روش نورد تجمعی ساخته شد. استفاده از روش نورد تجمعی در تولید فوم‌های تخلخل بستهٔ فلزی مزایای ویژه‌ای مانند اقتصادی بودن، بالا بودن بازدهی تولید، قابلیت به‌کارگیری انواع آلیاژها به‌عنوان فلز پایه و ساده بودن فرایند را به‌همراه دارد. در این تحقیق، پارامترهای مهم موثر بر افزایش درصد تخلخل در فوم تولید شده بررسی و مشخص شد که افزایش تعداد پاس‌های نورد منجر به افزایش درصد تخلخل در فوم نهایی می‌شود. همچنین افزایش دما و زمان فوم‌سازی تا رسیدن به دما و زمان بهینه، باعث افزایش درصد تخلخل در فوم تولیدی می‌شود؛ اما افزایش دما و زمان به مقادیر بالاتر از بهینه به کاهش درصد تخلخل منجر می‌شود. در این تحقیق، اثر نرخ گرمایشی به‌عنوان مهمترین پارامتر موثر بر افزایش درصد تخلخل در روش فوق بررسی و مشخص شد که در نرخ‌های گرمایشی پایین‌تر از $۱۰\frac{°C}{s}$، درصد تخلخل در فوم ناچیز بوده و در نرخ‌های گرمایشی بالاتر، درصد تخلخل افزایش می‌یابد. بیشترین تخلخل به‌ازای نرخ گرمایشی $۱۰\frac{°C}{s}$ به‌دست آمد.

۵- منابع

[1] Haijun Yu, Zhiqiang Guo, Bing Li, Guangchun Yao, Hongjie Luo, Yihan Liu, "Research into the effect of cell diameter of aluminum foam on its compressive and energy absorption properties"; Materials Science and Engineering A, 454–455,2007, pp542–546.

[2] Yi Feng, Haiwu Zheng, Zhengang Zhu, Fangqiou Zu, "The microstructure and electrical conductivity of aluminum alloy foams"; Materials Chemistry and Physics, 78, 2002, pp196–201.

[3] Srikanth Arisetty, Ajay K. Prasad, Suresh G. Advani, "Metal foams as flow field and gas diffusion layer in direct methanol fuel cells"; Journal of Power Sources, 165, 2007, pp49–57.

[4] A. A. Shirzadi1, Y. Zhu and H. K. D. H. Bhadeshia, "Joining Ceramics to Metals using Metallic Foam", Materials Science and Engineering A; 496, 2008, pp501-506.

[5] Dirk Schwingel, Hans-Wolfgang Seeliger, Claude Vecchionacci, Detlef Alwes, Jürgen Dittrich, "Aluminium foam sandwich structures for space applications"; Acta Astronautica, 61, 2007, pp326–330.

[6] J. Banhart, "Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams"; Progress in Materials Science, 46, 2001, pp559–632.
[7] Koichi Kitazono, Yusuke Kikuchi, Eiichi Sato, Kazuhiko Kuribayashi, "Anisotropic compressive behavior of Al–Mg alloy foams manufactured through accumulative roll-bonding process"; Materials Letters, 61, 2007, pp1771–1774.
[8] M. Alizadeh, M.H. Paydar, "Study on the effect of presence of TiH_2 particles on the roll bonding behavior of aluminum alloy strips"; Materials and Design, 30, 2009, pp82–86.
[9] X. Huang, N. Tsuji, N. Hansen, Y. Minamino, "Microstructural evolution during accumulative roll-bonding of commercial purity aluminum"; Materials Science and Engineering A, 340, 2003, pp265–271.
[10] K. Kitazono, E. Sato, K. Kuribayashi, "Novel manufacturing process of closed-cell aluminum foam by accumulative roll-bonding"; Scripta Materialia, 50, 2004, pp495–498.
[11] E.Z. Kurmaev, O. Morozova, T.I. Khomenko, Ch. Borchers, S.N. Nemnonov, Y. Harada, T. Tokushima, H. Osawa, T. Takeuchi, S. Shin, "Local bonding structure in mechanically activated TiH2 and TiH2 + graphite mixture"; Journal of Alloys and Compounds, 395, 2005, pp240-246.
[12] Jixiang Fang, Bingjun Ding, Zhimao Yang, Kang Zhao, Chenqing Gu, "The effect of SiO_2 and Al_2O_3 coating on the surface of TiH_2 powders on gas release"; Journal of Colloid and Interface Science, 283, 2005, pp1-4.
[13] Biljana Matijasevic, John Banhart, "Improvement of aluminium foam technology by tailoring of blowing agent"; Scripta Materialia, 54, 2006, pp503-508.