

بررسی بهینه‌سازی فراسنج‌های عملیات حرارتی به منظور تولید فوم‌های آلومینیمی با استفاده از فرآیند اتصال نوردی تجمعی (ARB)

احسان زنده‌باد^{۱*}، حبیب دانش‌منش^۲

چکیده

ورق‌های فوم آلومینیمی تولید شده با استفاده از فرآیند اتصال نوردی تجمعی دارای پتانسیل بالایی به منظور ساخت سازه‌های ساندویچی حاوی هسته از جنس فوم فلزی می‌باشند. طراحی جامع و همه جانبه‌ی این سازه‌ها نیازمند بهینه‌سازی فراسنج‌های فوم‌سازی، بویژه عملیات حرارتی فوم‌سازی است که موضوع اصلی این پژوهش نیز می‌باشد. استفاده از کوره‌های پیش‌گرم شده به‌عنوان جایگزینی برای کوره‌های مادون قرمز (که قابلیت تولید نرخ گرمایش‌های بالا را دارند) می‌تواند سبب تولید ساده‌تر و ارزان‌تر فوم‌های آلومینیمی گردد. برای تولید پیش‌فرم‌های آزمون‌های عملیات حرارتی، ذرات فوم‌ساز هیدرید تیتانیم با استفاده از ۷ سیکل متناوب جوش سرد نوردی و برش درون ساختار ورق آلومینیمی توزیع داده شد. سپس پیش‌فرم‌های تولید شده در یک کوره‌ی مقاوم‌ی پیش‌گرم شده تحت عملیات حرارتی فوم‌سازی قرار گرفتند. فراسنج‌های بهینه‌ی عملیات حرارتی فوم‌سازی برای دستیابی به بهترین ترکیب درصد تخلخل و مورفولوژی حفره‌ها استخراج گردید. بهترین شرایط فوم‌سازی سبب ایجاد فوم آلومینیمی حاوی ۳۷/۲ درصد تخلخل گردید.

واژه‌های کلیدی: اتصال نوردی تجمعی، فوم‌های آلومینیمی، عملیات حرارتی، TiH_2 .

۱- استادیار گروه مهندسی مواد دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات فارس، ایران.

۲- دانشیار گروه مهندسی مواد پردیس دانشکده‌های مهندسی، دانشگاه شیراز، ایران.

*- نویسنده‌ی مسئول مقاله: ehsan.zendehbad@gmail.com

پیشگفتار

فوم‌های فلزی به‌دلیل ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی مناسب نظیر سختی، استحکام بالا همراه با چگالی پایین، نفوذپذیری گاز بالا توأم با هدایت حرارتی بالا و...، کاربرد گسترده‌ای در زمینه‌های گوناگون مهندسی یافته‌اند [۱۲ و ۱]. روش‌های شناخته شده‌ی گوناگونی برای تولید فوم‌های فلزی وجود دارد که از آن میان می‌توان به دمش گاز به درون مذاب [۶-۳]، تجزیه‌ی ذرات در فاز مذاب [۷]، تجزیه‌ی ذرات در فاز جامد [۱۰-۸] و استفاده از مواد نگهدارنده‌ی فضا [۱۱ و ۱۲] اشاره نمود. سه روش نخست سبب ایجاد فوم‌های فلزی با حفره‌های بسته می‌گردند درحالی‌که روش آخر قابلیت تولید فوم با حفره‌های باز را دارا می‌باشد.

آلومینیم و آلیاژهای آن به‌دلیل چگالی پایین، در دسترس بودن و سهولت تبدیل به فوم، مناسب‌ترین گزینه به‌منظور تولید فوم‌های فلزی می‌باشند [۱۵-۱۳ و ۳]. مهم‌ترین روش‌های شناخته شده برای تولید فوم‌های آلومینیمی روش‌های مبتنی بر متالورژی پودر [۱۸-۱۶] و روش‌های مبتنی بر مذاب [۱۹ و ۱۳] می‌باشند. برخلاف آنکه در موارد محدودی از هیدرید زیرکونیم (ZrH_2) به‌عنوان عامل فوم‌ساز استفاده گردیده است [۲۰]، هیدرید تیتانیوم (TiH_2) که در دمای حدود ۴۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد تجزیه شده و هیدروژن آزاد می‌نماید [۱۲ و ۱]، به‌عنوان پرکاربردترین عامل فوم‌ساز در تولید فوم‌های آلومینیمی به‌کار رفته است [۱۹-۱۵]. گفتنی است که در روش‌های مبتنی بر متالورژی پودر تفاوت دمای تجزیه‌ی هیدرید تیتانیوم و و بازه‌ی دمایی کاهش استحکام زمینه‌ی آلومینیمی (۶۵۰ الی ۶۶۰ درجه‌ی سانتی‌گراد) سبب آزاد شدن هیدروژن در زمینه‌ی سخت آلومینیمی می‌گردد که به‌نوبه‌ی خود شکل‌گیری حفره‌هایی با شکل‌های نامنظم را در پی خواهد داشت. در این راستا تلاش‌های زیادی برای به تأخیر انداختن دمای شروع تجزیه‌ی هیدرید تیتانیوم انجام گرفته است که عمده‌ی آنها بر مبنای عملیات حرارتی پیشگرم ذرات هیدرید تیتانیوم برای شکل‌گیری یک لایه‌ی اکسید تیتانیوم روی ذرات استوار می‌باشد [۲۴-۲۱]. بهترین نتایج برای به تأخیر افتادن دمای شروع تجزیه‌ی ذرات، ۱۷۰ درجه‌ی سانتی‌گراد گزارش شده

است [۲۴].

فرآیند اتصال نوردی تجمعی که نخستین بار توسط سیتو^۱ و همکارانش به‌عنوان یک روش اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید معرفی گردید [۲۶ و ۲۵]، هم‌چنین، برای توزیع دادن ذرات فاز ثانویه درون ساختار یک ورق فلزی به‌منظور تولید ورق‌های کامپوزیتی زمینه فلزی (MMCها) مورد استفاده قرار گرفته است [۲۸ و ۲۷]. بر این اساس روش جدیدی به‌منظور تولید ورق‌های فوم‌های فلزی توسط کیتازونو^۲ و همکارانش بنا نهاده شد [۲۹ و ۱۵] که دارای پتانسیل بالایی به‌منظور تولید سازه‌های ساندویچی با استفاده از فرآیند اتصال نوردی تجمعی می‌باشد. در این روش ذرات فوم‌ساز هیدرید تیتانیوم با استفاده از فرآیند اتصال نوردی تجمعی در ساختار ورق‌های آلومینیمی توزیع داده می‌شود و پیش‌فرم‌های به‌دست آمده تحت عملیات حرارتی قرار گرفته و تبدیل به فوم می‌گردد. گفتنی است که در تولید فوم با استفاده از این روش به‌دلیل نیاز به ایجاد نرخ گرم کردن‌های بالا تاکنون از کوره‌های مادون قرمز استفاده گردیده است و استفاده از کوره‌های پیش‌گرم شده سبب کاهش چشمگیر قیمت تمام شده‌ی محصول و افزایش پتانسیل استفاده‌ی صنعتی از این روش به‌منظور تولید فوم‌های آلومینیمی و سازه‌های ساندویچی می‌گردد. در این پژوهش، فراسنج‌های چنین عملیات حرارتی استخراج شده و شرایط بهینه‌ی تولید فوم از دیدگاه درصد تخلخل و مورفولوژی حفره‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش پژوهش

تولید پیش‌فرم‌ها

در این پژوهش، از ورق کار سرد شده‌ی آلومینیم A۱۰۵۰ به‌عنوان ماده‌ی اولیه استفاده گردید. ورق مورد نظر به دو تسمه به ابعاد ۲۵×۳×۲۰ میلی‌متر برش داده شده و تسمه‌های به‌دست آمده پس از اعمال عملیات حرارتی آنیل به‌مدت یک ساعت در دمای ۳۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، به‌منظور چربی‌زدایی استن‌شویی گردیدند. سطح فصل مشترک تسمه‌ها با استفاده از برس فولادی

1- Saito

2- Kitazono

دما و زمان فوم‌سازی، در یک کوره‌ی مقاومتی که از پیش به دمای موردنظر رسانیده شده بود، مورد آزمون عملیات حرارتی قرار گرفت. دمای نگهداری از ۶۴۰ الی ۷۳۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و زمان نگهداری در هر دمای انتخابی از ۲ الی ۱۰ دقیقه تغییر داده شد. چگالی و درصد تخلخل هر یک از نمونه‌های به‌دست آمده با استفاده از روش ارشمیدس [۲] اندازه‌گیری گردیده و مورفولوژی حفره‌های فوم به‌دست آمده با استفاده از میکروسکوپ نوری مورد مطالعه قرار گرفت. به‌منظور اطمینان از استحکام جوش سرد ایجاد شده، آزمون لایه‌کنی با توجه به استاندارد ASTM-D ۹۰۳-۹۳ در حضور و عدم حضور ذرات فوم‌ساز در حین تولید پیش‌فرم‌ها انجام شد. از تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری^۱ (SEM) برای اطمینان بیشتر از توزیع یکنواخت ذرات فوم‌ساز در زمینه‌ی آلومینیمی استفاده گردید.

نتایج و بحث

نتایج آزمون لایه‌کنی در شرایط گوناگون چنان‌که در شکل ۲ نشان داده شده است، گویای ناکافی بودن کاهش ضخامت ۵۰ درصدی در حضور ذرات فوم‌ساز هیدرید تیتانیوم می‌باشد. درحالی‌که در درصد کاهش ضخامت ۶۶ درصد، جوش نوردی با استحکام کافی بین دو لایه‌ی آلومینیمی ایجاد گردیده است. با توجه به تئوری فیلم سطحی [۳۲ و ۳۳] می‌توان شکل‌گیری جوش در درصد‌های تغییر ضخامت بالاتر را به وسیع‌تر شدن نواحی ترک خورده در فصل مشترک دو لایه و تسهیل امکان اکستروژن شدن مواد بکر از بین این ترک‌ها و ایجاد پیوند بین این مواد بکر در حین جوش سرد نوردی نسبت داد. این پدیده در درصد کاهش ضخامت ۵۰ درصد به‌دلیل مداخله‌ی ذرات هیدرید تیتانیوم حاضر در فصل مشترک رخ نخواهد داد. هرچند که درصد کاهش ضخامت ۵۰ درصد به‌منظور ایجاد جوش با استحکام بالا در مراحل بعدی فرآیند ARB و در نبود ذرات فوم‌ساز کافی به‌نظر می‌رسد.

تصویر SEM از پیش‌فرم‌های تولید شده در مقطع "جهت نورد/جهت عمود"^۲ (RD/ND) در شکل (الف-۳) نشان

برس‌کاری شده و ۵/۰ درصد وزنی پودر هیدرید تیتانیوم به ابعاد کوچکتر از $40 \mu\text{m}$ روی یکی از سطوح برس‌کاری شده توزیع داده شد. به‌منظور مطمئن شدن از یکنواختی توزیع اولیه‌ی ذرات فوم‌ساز از دو لایه الک با مش ۱۰۰ استفاده گردید. تسمه‌های به‌دست آمده روی هم قرار داده شده و به‌منظور جلوگیری از لغزش احتمالی ورق‌ها بر روی یکدیگر در حین فرآیند نورد، گوشه‌های مجموعه‌ی به‌دست آمده سوراخ‌کاری شده و به‌کمک سیم‌های نازک فولادی بسته شدند. پس از آن جوش سرد نوردی با درصد کاهش ضخامت ۶۶ درصد با استفاده از غلطک‌های نورد به قطر ۱۷۰ و پهنای ۱۲۰ میلی‌متر با سرعت چرخش ۵ دور بر دقیقه بین دو تسمه اعمال گردید. درصد کاهش ضخامت ۶۶ درصد در مرحله‌ی نخست به‌منظور مطمئن شدن از ایجاد جوش سرد بین دو تسمه در حضور ذرات فوم‌ساز انتخاب گردید [۳۰]. سپس تسمه‌ی محصول برای از بین بردن اثر کرنش‌های تجمعی به مدت یک ساعت در دمای ۳۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد آنیل گردیده و در راستای طولی به سه قسمت مساوی برش داده شد. پس از طی مراحل آماده‌سازی سطحی شامل چربی‌زدایی و برس‌کاری سه تسمه برای ایجاد مجموعه‌ای به ضخامت ۶ میلی‌متر روی هم قرار داده شده و مجموعه‌ی به‌دست آمده با درصد کاهش ضخامت ۵۰ درصد تحت جوش سرد نوردی قرار گرفت. نتیجه‌ی این مرحله تسمه‌ای به ضخامت ۳ میلی‌متر حاوی ۶ لایه ورق آلومینیم و ۳ لایه ذرات فوم‌ساز می‌باشد. سپس چرخه‌ی مراحل پشت‌سرهم برش به دو نیمه مساوی، آنیل، اصلاح لبه‌های ترک خورده، آماده‌سازی سطحی، روی هم قرار دادن و نورد با درصد کاهش ضخامت ۵۰ درصد، پنج بار تکرار گردید که نتیجه‌ی این ۵ مرحله، تسمه‌ای به ضخامت ۳ میلی‌متر حاوی ۹۶ لایه ذرات فوم‌ساز بود که توزیع نسبتاً یکنواختی از ذرات فوم‌ساز در ساختار ورق را تأمین می‌نمود. تصویر شماتیکی از مراحل تولید پیش‌فرم‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است.

عملیات حرارتی فوم‌سازی

پیش‌فرم‌های آماده شده به ابعاد $15 \times 15 \times 3$ میلی‌متر برش داده شده و قطعات به‌دست آمده در شرایط گوناگون

1- Scanning Electron Microscope
2- Rolling Direction/Normal Direction

و کاهش درصد تخلخل فوم‌های تولید شده مشاهده می‌گردد که این افزایش دوباره را چنان‌که در شکل ۷ نشان داده شده است، می‌توان به پدیده‌ی "سوراخ شدن حفره‌ها"^۲ و "فرار گاز"^۳ نسبت داد [۷]. همچنین، در سیکل‌های عملیات حرارتی با دما و زمان نگهداری نسبتاً بالا به‌دلیل به‌هم پیوستگی حفره‌ها و "سیلان رو به پایین مذاب"^۴ [۳۵]، شکل حفره‌ها از شکل‌های نسبتاً کروی به حفره‌های بی‌شکل و با اندازه‌ی بزرگ تبدیل می‌گردد. نمونه‌ای از حفره‌های شکل گرفته در چنین شرایط عملیات حرارتی در شکل ۸ نشان داده شده است.

شکل ۹، نشان دهنده‌ی تغییرات چگالی و درصد تخلخل فوم‌های تولید شده در شرایط گوناگون بر حسب زمان نگهداری در دماهای گوناگون فوم‌سازی می‌باشد. چنان‌که مشاهده می‌شود در زمان‌های نگهداری کم‌تر از ۳ دقیقه در هیچ دمای فوم‌سازی انبساط قابل توجهی در زمینه پدید نمی‌آید. این عدم انبساط را می‌توان به افت دمای کوره در اثر باز و بسته شدن درب کوره به‌هنگام قرار دادن نمونه در آن نسبت داد. این تغییرات دمایی با قرار دادن یک ترموکوپل در محل قرارگیری نمونه و ثبت دمای نمونه بر حسب زمان در اثر باز و بسته نمودن درب کوره مورد مطالعه قرار گرفت که نتایج آن در شکل ۱۰ نشان داده شده است. چنان‌که در این شکل قابل مشاهده است، دمای محل قرارگیری نمونه پس از حدود ۱۷۰ ثانیه به دمای مورد نظر باز می‌گردد که این روند بازیابی دما دلیلی برای عدم بروز انبساط قابل توجه در زمینه برای زمان‌های نگهداری کم‌تر از ۳ دقیقه می‌باشد. همچنین، در زمان‌های نگهداری بالاتر از ۵ دقیقه کاهش تدریجی چگالی (افزایش تدریجی درصد تخلخل) در فوم‌های تولیدی با افزایش دمای فوم‌سازی مشاهده می‌گردد.

بررسی مورفولوژی حفره‌ها در فوم‌های تولیدی نشان می‌دهد که بهترین شرایط فوم‌سازی در شرایط $700^{\circ}\text{C}/5\text{ min}$ رخ می‌دهد که نمونه‌ای از فوم تولید شده در این شرایط در شکل ۱۱ دیده می‌شود. شکل حفره‌ها کاملاً کروی نیست و شکل‌گیری چنین حفره‌های بی‌شکلی را می‌توان به تفاوت قابل ملاحظه‌ی دمای

داده شده است که گویای توزیع نسبتاً یکنواخت ذرات فوم ساز در ساختار ورق پیش‌فرم به‌دست آمده می‌باشد. همچنین همان‌گونه که دیده می‌شود، اندازه‌ی ذرات فوم‌ساز از $40\ \mu\text{m}$ اولیه نزدیک به $2\ \mu\text{m}$ کاهش یافته است که این کاهش اندازه، شکستن و توزیع دوباره‌ی تدریجی ذرات فوم‌ساز در اثر فشار شدید در فصل مشترک در حین نورد را نشان می‌دهد. تصویر یک ذره‌ی هیدرید تیتانیوم شکسته شده در شکل (ب-۳) نشان داده شده است.

نمودار تغییرات چگالی و درصد تخلخل فوم‌های تولید شده بر حسب زمان نگهداری برای دماهای ثابت فوم‌سازی در شکل ۴ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در دماهای نگهداری 640 تا 660 درجه‌ی سانتی‌گراد با افزایش زمان نگهداری، چگالی فوم‌های تولیدی با روندی بسیار کند کاهش یافته است. این کاهش را می‌توان به استحکام نسبتاً بالای زمینه‌ی آلومینیمی و عدم توانایی هیدروژن آزاد شده برای منبسط نمودن این زمینه‌ی آلومینیمی نسبت داد. حفره‌ها در چنین سیکل‌های عملیات حرارتی، شکلی ترک مانند دارند. نمونه‌ای از فوم تولید شده در سیکل عملیات حرارتی $660^{\circ}\text{C}/5\text{ min}$ در شکل ۵ نشان داده شده است.

برای دماهای فوم‌سازی از 670 الی 700 درجه‌ی سانتی‌گراد، چگالی فوم‌های تولید شده به‌گونه‌ی تقریباً یکنواختی کاهش پیدا می‌کند. این روند را می‌توان به کاهش نسبی استحکام زمینه‌ی آلومینیمی در دماهای بالاتر و افزایش امکان انبساط زمینه در اثر تجزیه‌ی عامل فوم‌ساز نسبت داد. با این حال در زمان‌های بالاتر نگهداری در این بازه‌ی دمایی، اندازه‌ی حفره‌ها چنان‌که در شکل ۶ نشان داده شده است، به‌دلیل بروز پدیده‌ی "به‌هم پیوستگی حفره‌ها"^۱ افزایش می‌یابد. گفتنی است که افزایش اندازه‌ی حفره‌ها در فوم‌های فلزی مطلوب نبوده و سبب افت ویژگی‌های مکانیکی فوم‌های تولیدی می‌گردد [۱]. در دماهای فوم‌سازی بالاتر از 700 درجه‌ی سانتی‌گراد با افزایش زمان نگهداری از 2 تا 6 دقیقه، چگالی فوم‌های تولیدی به تدریج کاهش می‌یابد. اما در زمان‌های نگهداری بالاتر از 6 دقیقه دوباره افزایش چگالی

2- Pore Puncturing
3- Gas Escape
4- Drainage

1- Coalescence

که فوم آلومینیمی تولید شده در چنین شرایطی دارای درصد تخلخل $37/2$ درصد و چگالی $1/7 \text{ g/cm}^3$ (چگالی نسبی $0/63$) خواهد بود.

سپاسگذاری

نویسندگان مقاله از دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات فارس و نیز بخش مهندسی مواد دانشگاه شیراز به دلیل حمایت و پشتیبانی از این پژوهش تشکر می‌نمایند.

فوم سازی و دمای آغاز تجزیه‌ی TiH_2 نسبت داد. گفتنی است که عملیات حرارتی پیش‌گرم پودرهای TiH_2 که در روش‌های فوم‌سازی بر مبنای متالورژی پودر به‌عنوان روشی کارآمد در بهبود مورفولوژی حفره‌ها عنوان گردیده است [۲۴-۲۱]، در این روش کارآیی نخواهد داشت. زیرا لایه‌ی اکسیدی که در حین عملیات پیش‌گرم روی ذرات TiH_2 شکل می‌گیرد و نقش اصلی را در به تأخیر انداختن دمای آغاز تجزیه‌ی ذرات ایفا می‌کند، در این روش در اثر فشار نورد خواهد شکست که این پدیده پیش‌تر در شکل (ب-۳) نشان داده شده است. همچنین، با توجه به شکل ۱۱ تغییراتی در اندازه‌ی حفره‌ها در طول نمونه دیده می‌شود که سبب ایجاد حفره‌هایی با اندازه‌ی متغیر از $0/1$ تا 3 میلی‌متر می‌گردد. این تغییرات را می‌توان به آگلومره شدن ذرات TiH_2 و عدم توانایی روش تولید در شکستن آگلومره‌ها و توزیع دادن کاملاً تصادفی و یکنواخت ذرات، بویژه در جهت عرضی نسبت داد. به نظر می‌رسد اعمال فرآیند "نورد متقاطع" نتیجه‌ی بهتری در شکستن این آگلومره‌ها بدست می‌دهد.

نتیجه گیری

در این پژوهش، فراسنج‌های عملیات حرارتی فوم‌سازی در کوره‌های پیش‌گرم شده به‌منظور تولید فوم‌های آلومینیمی با استفاده از فرآیند اتصال نوردی تجمعی برای دستیابی به بهترین ترکیب ممکن از نظر درصد تخلخل و مورفولوژی حفره‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. بیشترین درصد تخلخل $46/4$ درصد که معادل با حداقل چگالی $1/45 \text{ g/cm}^3$ (چگالی نسبی $0/53$) است در رژیم عملیات حرارتی با دمای فوم‌سازی 720 درجه‌ی سانتی‌گراد و زمان نگهداری 7 دقیقه به‌دست آمد. مورفولوژی حفره‌های شکل گرفته در فوم‌های تولیدی از حفره‌های ترک‌مانند در رژیم‌های با دما و زمان فوم‌سازی پایین تا حفره‌های بی‌شکل و بزرگ در رژیم‌های دارای دما و زمان فوم‌سازی بالا متغیر است. شرایط بهینه‌ی دما و زمان فوم‌سازی که دارای بهترین ترکیب از نظر درصد تخلخل و مورفولوژی حفره‌ها می‌باشد با دمای فوم‌سازی 700 درجه‌ی سانتی‌گراد و زمان نگهداری 5 دقیقه پیشنهاد می‌گردد،

References:

- 1- J. Banhart, Manufacture, Characterization and application of cellular metals and metal foams, *Prog. Mater. Sci.*, 46(2001), p. 559.
- 2- 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*, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000.
- 3- J. Elliot, Metal foam and method for making, US Patent 2983597, 1961.
- 4- W.S. Fiedler, Method for making metal foam bodies, US Patent 3214265, 1965.
- 5- P.W. Hardy and W. Peisker, Method for producing a lightweight foamed metal, US Patent 3300296, 1967.
- 6- L.M. Niebylski, C.P. Jarema and T.E. Lee, aggregated product, US Patent 3055763, 1962.
- 12- H.A. Kuchek, Method for making porous metallic article, US Patent 3236706, 1966.
- 13- A.E. Simone and L.J. Gibson, Aluminum foams produced by liquid-state processes, *Acta Mater.* 46, p. 3109, 1998.
- 14- B. Sosnik, Process for Making Foam-like Mass of Metal, US Patent 2434775, 1948.
- 15- K. Kitazono, E. Sato and K. Kuribayashi, Novel manufacturing of closed-cell aluminum foam by accumulative roll-bonding, *Scr. Mater.*, 50, p. 495, 2004.
- 16- F. Baumgartner, I. Duarte and J. Banhart, Industrialisation of P/M Foaming Process, *Adv. Eng. Mater.*, 2, p. 168, 2000.
- 17- S. Asavavisithchai and A.R. Kennedy, Effect of powder oxide content on the expansion and stability of PM-route Al foams, *J. Colloid Interface Sci.*, 297, p. 715, 2006.
- 18- S. Esmaelzadeh, A. Simchi and D. Lehmhus, Effect of ceramic particle addition on the foaming behavior, cell structure and mechanical properties of P/M AlSi₇ foam, *Mater. Sci. Eng.*, A424, p. 290, 2006.
- 19- S. Akiyam, H. Ueno, K. Imagawa, A. Kitahara, S. Nagata, K. Morimoto and et al, Foamed metal and method of producing same, US Patent 4713277, 1987.
- 20- S.E. Speed, Foaming of metal by the catalyzed and controlled decomposition of zirconium hydride and titanium hydride, US Patent 3981720, 1976.
- 21- F. Han, Z. Zhu, J. Gao and W. Song, Effect of oxidation treatment and surface filming on hydrogen degassing from TiH₂, *Metall. Trans. B*, 29, p. 1315, 1998.
- 22- A.R. Kennedy, The effect of TiH₂ heat Reinforced foamed metal, US Patent 3940262, 1976.
- 7- J. Banhart, J. Baumeister, A. Melzer and M. Weber, Composite material component, especially an optionally foamable die cast metal matrix composite component, is produced, German Patent 19813176, 1999.
- 8- J. Baumeister, Methods for manufacturing foamable metal bodies, US Patent 5151246, 1992.
- 9- J.F. Pashak, Cellularized light metal, US Patent 2935396, 1960.
- 10- B.C. Allen, M.W. Mote and A.M. Sabroff, Method of making foamed metal, US Patent 3087807, 1963.
- 11- J.R. Kreigh and J.K. Gibson, Metal-treatment on gas release and foaming in Al-TiH₂ preforms, *Scr. Mater.*, 47, p. 763, 2002.
- 23- A.R. Kennedy and V.H. Lopez, The decomposition behavior of as-received and oxidized TiH₂ foaming agent powder, *Mater. Sci. Eng.*, A357, p. 258, 2003.
- 24- B. Matiasevic-Lux, J. Banhart, S. Fiechter, O. Gorke and N. Wanderka, Modification of Titanium Hydride for Improved Aluminum Foam Manufacture, *Acta Mater.*, 54, p. 1887, 2006.
- 25- Y. Saito, N. Tsuji, H. Utsunomiya, T. Sakai and R.G. Hong, Ultra-Fine Grained Bulk Aluminum Produced by Accumulative Roll-Bonding (ARB) Process, *Scr. Mater.*, 39(1998), p. 1221.
- 26- Y. Saito, H. Utsunomiya, N. Tsuji and T. Sakai, Novel Ultra-High Straining Process for Bulk Materials, Development of the Accumulative Roll-Bonding (ARB) Process, *Acta mater.*, 47(1999), p. 579.
- 27- M. Alizadeh and M.H. Paydar, Fabrication of Al/SiC_p composite strips by repeated roll-bonding (RRB) process, *J. Alloys Compd.*, 477(2009), p. 811.
- 28- C. Lu, K. Tieu and D. Wexler, Significant enhancement of bond strength in the accumulative roll bonding process using nano-sized SiO₂ particles, *J. Mater. Process. Technol.*, 209(2009), p. 4830.
- 29- K. Kitazono, Y. Kikuchi, E. Sato and K. Kuribayashi, Anisotropic Compressive Behaviour of Al-Mg Alloy Foams Manufactured through Accumulative Roll-Bonding Process, *Mater. Lett.*, 61(2007), p. 1771.
- 30- M. Alizadeh and M.H. Paydar, Study on

the effect of presence of TiH_2 particles on the roll bonding behavior of aluminum alloy strips, Mater. Des., 30(2009), p. 82.

31- M. Eizadjou, H. Danesh Manesh and K. Janghorban, Investigation of roll bonding between aluminum alloy strips, Mater. Des., 29(2008), p. 909.

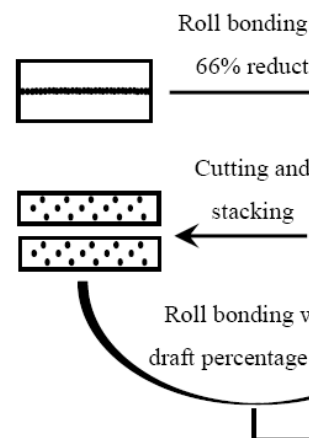
32- P.K. Wright, D.A. Snow and C.K. Tay, Interfacial Conditions and Bond Strength in Cold Pressure Welding by Rolling, Met. Technol., 5(1978), p. 24.

33- L.R. Vaidyanath, M.G. Nicholas and D.R. Milner, Pressure Welding by Rolling, Br. Weld. J., 6(1959), p.13.

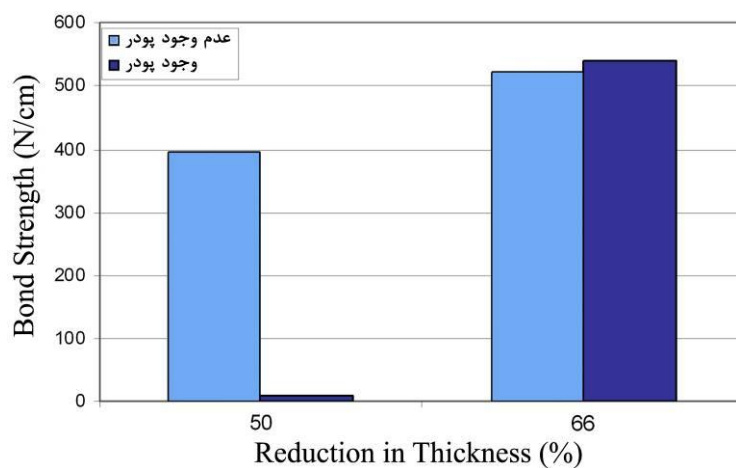
34- I. Duarte and J. Banhart, A Study of Aluminum Foam Formation- Kinetics and Microstructure, Acta Mater., 48(2000), p. 2349.

35- V. Gergely and T.W. Clyne, Drainage in Standing Liquid Metal Foams: Modelling and Experimental Observations, Acta Mater., 52(2004), p. 3047.

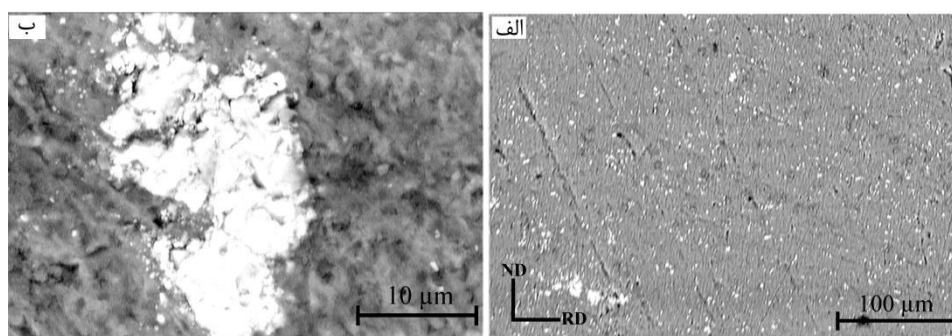
پیوست‌ها



شکل ۱- تصویر شماتیک از مراحل تولید پیش‌فرم‌ها.

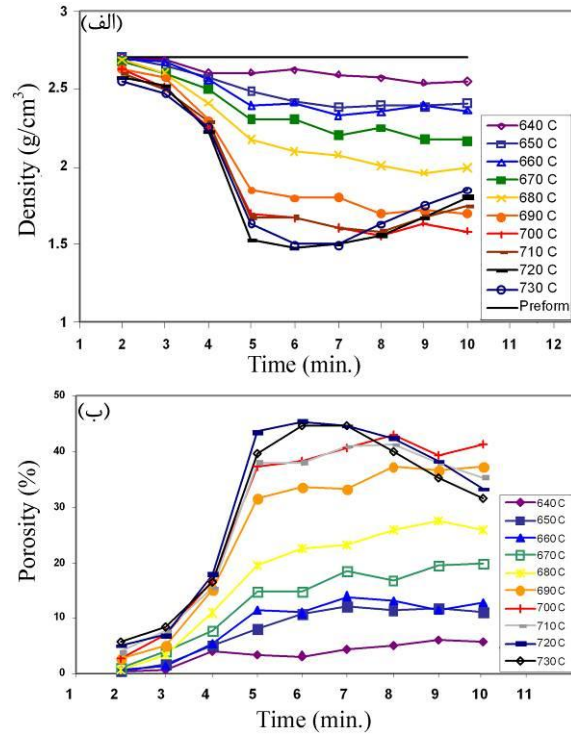


شکل ۲- نتایج آزمون لایه‌کنی در شرایط گوناگون.

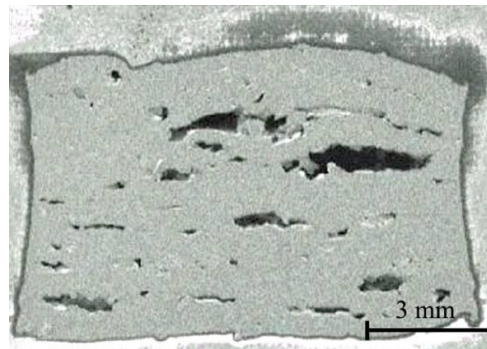


شکل ۳- الف) تصویر SEM در جهت RD/ND پیش‌فرم تولید شده

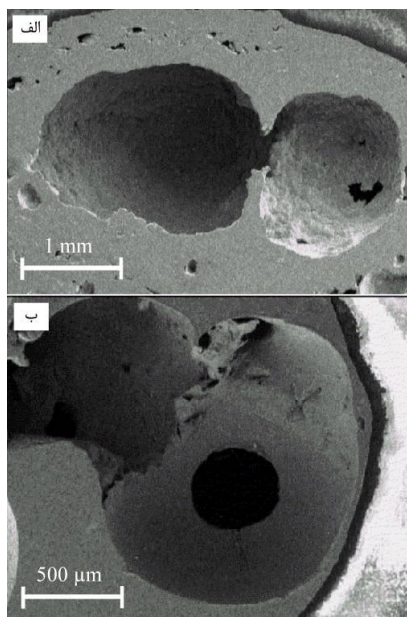
ب) شکستن یک ذره‌ی هیدرید تیتانیوم در اثر فشار نورد



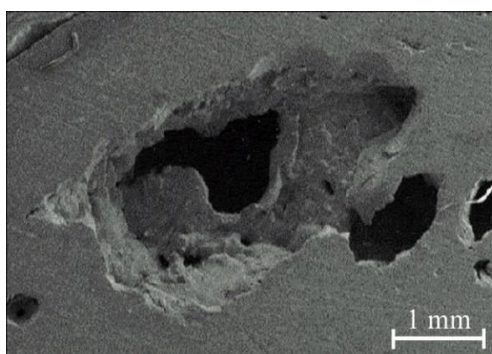
شکل ۴- الف) چگالی و ب) درصد تخلخل فوم‌های تولید شده بر حسب زمان نگهداری



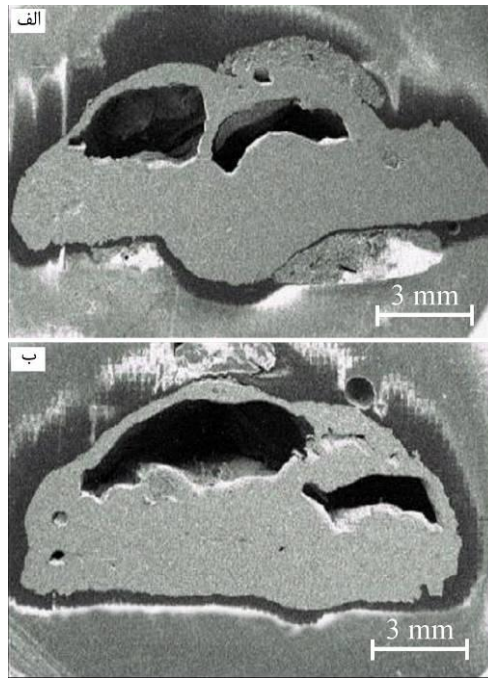
شکل ۵- شکل‌گیری حفره‌های ترک‌مانند در نمونه‌ی تولید شده در سیکل عملیات حرارتی ۶۶۰ °C / ۱۵ min



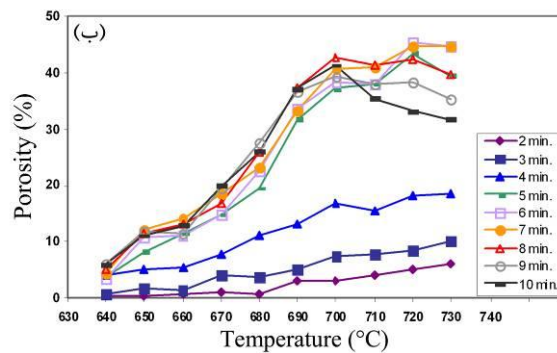
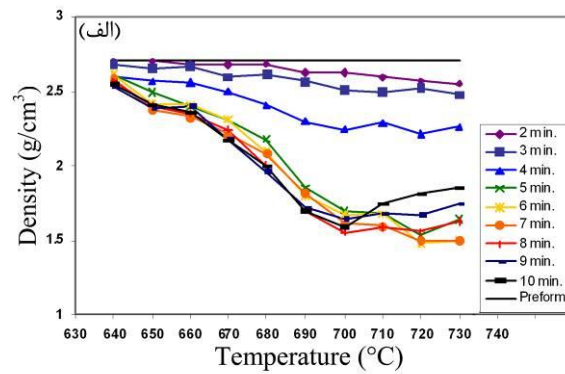
شکل ۶- به هم پیوستن حفره‌ها در فوم‌های تولید شده در سیکل عملیات حرارتی
الف) $700^{\circ}\text{C} / 6 \text{ min}$ ب) $690^{\circ}\text{C} / 8 \text{ min}$



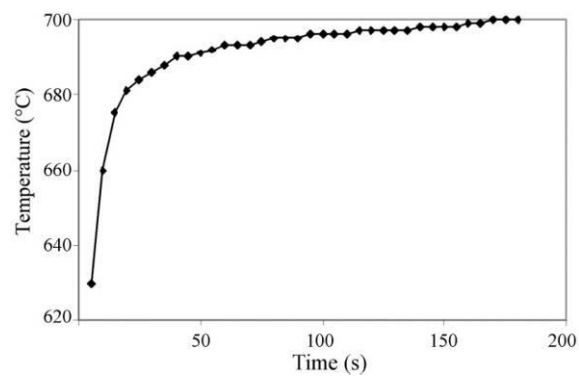
شکل ۷- سوراخ شدن حفره‌ها و فرار گاز در نمونه‌های تولید شده در نمونه تولید شده
در شرایط فوم‌سازی $720^{\circ}\text{C} / 7 \text{ min}$



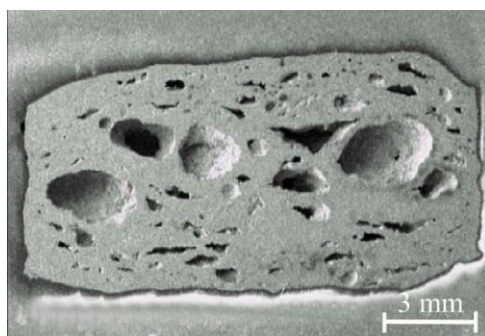
شکل ۸- شکل‌گیری حفره‌های بی‌شکل با اندازه‌ی بزرگ در نمونه‌های تولید شده در شرایط فوم‌سازی (الف) $720^{\circ}\text{C} / 10 \text{ min}$ و (ب) $730^{\circ}\text{C} / 7 \text{ min}$



شکل ۹- تغییرات (الف) چگالی و (ب) درصد تخلخل فوم‌های تولید شده بر حسب دمای فوم‌سازی در زمان‌های نگهداری متفاوت



شکل ۱۰- تغییرات دمایی محل قرارگیری نمونه در کوره برحسب زمان در اثر باز و بسته شدن درب کوره



شکل ۱۱- نمونه تولید شده در شرایط فوم‌سازی $700^{\circ}\text{C} / 5 \text{ min}$