

بررسی خواص مکانیکی و ساختار فوم کامپوزیتی زمینه آلومینیومی تهیه شده به روش ریخته-گری گرانشی با استفاده از کره‌های تو خالی فولادی

حمید رضا داوری^{۱*}، هومن غلام زاده^۲، فرزانه ضیایی^۳، ابوالقاسم دهقان^۴، محمد حسین پایدار^۵، سید مجتبی زبرجد^۶

چکیده

فوم کامپوزیتی فلزی، گروه جدیدی از خانواده مواد متخلخل و سلولی است. این مواد علاوه بر داشتن دانسیته و وزن کم قابلیت جذب انرژی بالایی دارند که برای استفاده در صنایعی چون خودروسازی بسیار مناسب می‌باشد. در این تحقیق فوم کامپوزیتی زمینه آلومینیومی با استفاده از کره‌های تو خالی فولاد کم کربن و فولاد زنگ نزن به روش ریخته‌گری گرانشی تولید شد. این فوم شامل کره‌های تو خالی در زمینه‌ای از آلیاژ آلومینیوم A356 است. در این تحقیق رفتار جذب انرژی فوم کامپوزیتی تحت نیروی تک محوری فشاری بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که این فوم‌ها نه تنها استحکام بیش‌تری نسبت به فوم‌های تجاری ساخته شده از مواد مشابه دارد، بلکه نسبت استحکام به چگالی بالاتری نیز دارند. علاوه بر این، فوم‌های فلزی معمولاً به دلیل غیرهمسانگرد بودن ساختار و غیر قابل پیش بینی بودن رفتار فوم تحت اعمال نیرو، محدودیت‌های کاربردی دارند. اما فوم‌های کامپوزیتی ساخته شده با استفاده از کره‌های تو خالی به دلیل یکسان بودن شکل، اندازه و ضخامت دیواره سلول‌ها دارای ساختاری همسانگرد و در نتیجه رفتاری قابل پیش بینی‌تر نسبت به فوم‌های فلزی رایج دارند.

واژه‌های کلیدی: کره‌های تو خالی فولادی، آلومینیوم، فوم کامپوزیتی، جذب انرژی

^۱ - کارشناسی ارشد انتخاب و شناسایی مواد مهندسی، دانشگاه شیراز
^۲ - کارشناسی ارشد انتخاب و شناسایی مواد مهندسی، دانشگاه شیراز
^۳ - کارشناسی ارشد انتخاب و شناسایی مواد مهندسی، دانشگاه شیراز
^۴ - استادیار مهندسی مواد، دانشگاه شیراز
^۵ - استاد مهندسی مواد، دانشگاه شیراز
^۶ - استاد مهندسی مواد، دانشگاه شیراز
^{*} - نویسنده مسوول مقاله: hamid_rd1365@yahoo.com

پیشگفتار

فوم‌های فلزی خانواده‌ای از مواد متخلخل با خواص ویژه و منحصر به فرد مکانیکی، فیزیکی، حرارتی، الکتریکی و صوتی هستند. این فوم‌ها، دارای ساختار سلولی با خواصی از جمله چگالی نسبتاً کم، استحکام، چقرمگی و قدرت جذب انرژی بالا هستند. هم‌چنین این مواد عایق مناسبی در برابر حرارت و صوت هستند [۱]. از فوم‌های فلزی به عنوان هسته‌ی پنل‌های ساندویچ مانند، استحکام دهنده سازه‌های پوسته‌ای، جاذب انرژی در سپر خودرو و بعنوان مبدل حرارتی در ساخت قطعات الکتریکی استفاده می‌شود. فوم‌های فلزی به علت نسبت استحکام به چگالی بالا، پایداری زیاد و قابلیت جذب انرژی بیشتر تحت تنش‌های اعمالی در جهات مختلف نسبت به فوم‌های پلیمری و مواد متراکم جامد، اهمیت ویژه‌ای یافته‌اند. فوم‌های فلزی بر اثر اعمال نیروی تک محوری فشاری در گستره‌ای از کرنش تحت تنش ثابت تغییر فرم پلاستیک می‌دهند و قبل از فشردگی کامل، انرژی برخورد را جذب می‌کنند. خواص مکانیکی فوم‌ها شدیداً وابسته به اندازه، شکل، ضخامت دیواره و نحوه اتصال سلول‌های فوم می‌باشد [۲،۳].

در فوم‌های آلومینیومی به دلیل وجود سلول‌هایی با شکل و اندازه و ضخامت دیواره مختلف، رفتار مکانیکی فوم تحت اعمال نیرو ناهمسانگرد می‌باشد و پیش‌بینی رفتار فوم مشکل است. در فوم کامپوزیتی جدید می‌توان اندازه و ضخامت دیواره سلول‌ها را کنترل نمود. کره‌های تو خالی فولادی، اندازه، شکل و ضخامت دیواره یکسانی دارند و می‌توانند در ساخت فوم با ساختار منظم و همسانگرد به کار گرفته شوند [۴].

فوم‌های فلزی به دو گروه کلی فوم‌های سلول بسته و فوم‌های سلول باز دسته بندی می‌شوند. گیبسون و اشبی [۵] رابطه‌ای بین مدول الاستیک فوم و چگالی نسبی فوم طبق معادله‌ی (۱) معرفی کردند.

$$\frac{E^*}{E_s} = \varphi^2 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^2 + 0.5(1 - \varphi) \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right) \quad (1)$$

در این معادله، E^* و E_s مدول یانگ فوم و ماده متراکم، ρ^* و ρ_s چگالی فوم و ماده متراکم، φ کسر حجمی ماده در لبه‌های سلول است.

برای یک فوم با سلول‌های باز مقدار $\varphi=1$ است، زیرا جرمی در دیوارسلول نیست و سفتی فقط تابع مجذور چگالی نسبی می‌باشد. اگر کل ماده در دیواره سلول باشد $\varphi=0$ و رابطه تابعی از چگالی است. گیبسون و اشبی [۵] رابطه‌ی استحکام فوم-های انعطاف‌پذیر و چگالی را چنین تعریف کرده‌اند.

$$\frac{\sigma^*}{\sigma_s} = 0.3\varphi \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^{1.5} + 0.35(1 - \varphi) \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right) \quad (2)$$

در این معادله σ^* و σ_s استحکام فوم و ماده متراکم است.

طبق این رابطه فوم‌های سلول بسته دارای چقرمگی و استحکام بین ۵ تا ۷ برابر فوم‌های سلول باز می‌باشد.

یکی از روش‌های ساخت فوم‌های فلزی سلول بسته استفاده از کره‌های تو خالی پیش ساخته است. ج. کوچران [۴] تحقیقاتی بر روی ساخت فوم سلول بسته با استفاده از کره‌های تو خالی سرامیکی انجام داد. ساختار این فوم خواص مکانیکی قابل ملاحظه-ای نسبت به فوم‌های آلومینیومی سلول باز داشت، اما این نمونه‌ها بسیار شکننده بود و هم‌چنین توانایی جذب انرژی کمی داشت. به همین دلیل تحقیقاتی به منظور جایگزینی کره‌های توی خالی سرامیکی با کره‌های توی خالی فلزی انجام شد [۶]. ب. نویل [۸] تحقیقاتی در زمینه ساخت فوم زمینه آلومینیومی با بکارگیری کره‌های تو خالی فولادی انجام داد. در این روش فضای بین کره‌های فولادی با استفاده از پودر آلومینیوم پر می‌شود. سپس پودر آلومینیوم توسط عملیات تفجوشی به خواص مطلوب دست می‌یابد. فوم تولید شده به این روش از استحکام بیش‌تری نسبت به سایر فوم‌های موجود برخوردار است.

گلوله‌های تو خالی به درون راهباز مذاب جلوگیری شود.

در این عملیات دمای مذاب باید به گونه‌ای انتخاب شود که علاوه برداشتن سیالیت مناسب برای جریان یافتن در فضای کم بین کره‌ها از انرژی کافی برای ذوب کردن توری‌های آلومینیومی نیز برخوردار باشد. دمای فوق‌گداز مناسب جهت انجام ریخته‌گری (با در نظر گرفتن جرم توری‌ها، جرم مذاب لازم برای پر کردن قالب و در نظر گرفتن سایر عوامل) در حدود ۷۹۰ درجه سانتی‌گراد برآورد شد. به منظور جلوگیری از انجماد مذاب قبل از پر شدن کامل فضای بین کره‌های توخالی، پیش از انجام ریخته‌گری، قالب تا حدود ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد پیش گرم شد.

آزمایش‌ها:

پس از تولید نمونه‌ها، خواص مکانیکی آنها بررسی و ریزساختار آنها توسط میکروسکوپ الکترونی مشاهده شد. آزمون فشار تک محوره توسط دستگاه "Torse ASC20"، میزان کرنش توسط دستگاه "San Star Torse ASC20" و آزمون میکروسختی توسط دستگاه "Koopaa MH1" اندازه‌گیری شد.

بنابر استاندارد فوم‌ها، نمونه‌ها جهت آزمون فشار تک محوری باید به گونه‌ای باشند که در هر ضلع حداقل ۸ تا ۱۰ سلول وجود داشته باشد [۸]. با توجه به این مسئله ابعاد نمونه‌های تهیه شده جهت انجام آزمون استوانه‌هایی با ارتفاع ۴۵ میلی‌متر و قطر ۳۵ میلی‌متر انتخاب شد. نسبت حجمی کره‌های به کار رفته در تهیه نمونه‌هایی شامل تعداد مشخص از کره‌های توخالی فولادی زنگ‌نزن و کره‌های توخالی فولادی کم کربن پس از محاسبه به ترتیب در حدود ۴۱ و ۳۷ درصد محاسبه شد.

آزمون فشار با سرعت ۰/۱ میلی‌متر بر ثانیه و هم‌چنین آزمون‌های میکروسختی با اعمال بار ۱۰ گرم بر روی نمونه‌ها انجام شد. چگالی نسبی با استفاده از معادله ۳ و چگالی تئوری با استفاده از معادله ۴ تعیین می‌شود:

در این پژوهش فومی با سلول‌های بسته به وسیله‌ای پرکردن فضای خالی بین کره‌های تو خالی با آلیاژی از آلومینیوم به روش ریخته‌گری گرانشی ساخته می‌شد. در ساخت فوم‌های فلزی از کره‌های فولاد زنگ‌نزن و فولاد کم کربن استفاده شد. در این مقاله به بررسی خواص مکانیکی، فیزیکی و ساختار فوم‌های کامپوزیتی آلومینیوم-فولاد کم کربن و آلومینیوم-فولاد زنگ‌نزن توسط آزمون فشار تک محوری، میکروسختی و عکس برداری با میکروسکوپ الکترونی پرداخته شده‌است.

مواد و روش تحقیق

مواد:

در این پژوهش از دو نوع کره تو خالی فولاد کم کربن و فولاد زنگ‌نزن تولید شرکت فرانهور آلمان که به روش متالورژی پودر تهیه شده [۶۵] و آلیاژ آلومینیوم A 356 به عنوان فلز زمینه استفاده شد. از آلیاژ آلومینیوم A356 با ۷٪ سیلیکون به دلیل سیالیت مناسب، چگالی کم، استحکام بالا و انقباض کم حین انجماد می‌باشد به عنوان زمینه استفاده شد. ترکیب شیمیایی کره‌ها و فلز زمینه در جدول ۱ آورده شده است.

روش تهیه فوم:

ریخته‌گری به روش گرانشی و در قالب ماسه- CO_2 (طبق شکل ۱) انجام شد. قالب جهت سیالان مذاب به صورت کف ریز طراحی شد، چرا که گازهای محبوس در فضای اطراف کره‌های توخالی فرصت کافی برای خروج داشته باشند (شکل ۱). ریخته‌گری در ماسه CO_2 به دلیل صرفه اقتصادی و سطح نهایی مناسب انتخاب شد.

در این فرآیند کره‌ها به روش ساندریجی درون قالب قرار گرفت. بدین ترتیب که در کف قالب یک لایه کره فولادی با تعداد مشخص چیده شد سپس بر روی آن یک توری آلومینیومی به ضخامت ۱ میلی‌متر قرار گرفت. این روند تا پر شدن قالب ادامه یافت. در کف قالب نیز یک توری فولاد قرار داده شد که هم به عنوان فیلتر عمل می‌کند و هم از ریزش

$$\rho_{rel} = \frac{\rho}{\rho_S} \quad (3)$$

که در این معادله ρ_{rel} چگالی نسبی، ρ چگالی فوم و ρ_S چگالی زمینه متراکم است.

$$\rho = V_{Ma}\rho_{Ma} + V_{Sp}\rho_{Sp} \quad (4)$$

در این معادله V_{Ma} نسبت حجمی زمینه، ρ_{Ma} چگالی زمینه، V_{Sp} نسبت حجمی کره‌های تو خالی و ρ_{Sp} چگالی کره‌های تو خالی است.

چگالی عملی نمونه‌های تهیه شده از طریق اندازه‌گیری نسبت جرم به حجم واقعی به دست آمد. میزان تغییر حجم آب پس از غوطه‌وری نمونه‌ها حجم واقعی نمونه را به دست داد و اندازه‌گیری جرم نمونه‌ها به وسیله ترازوی دیجیتال انجام شد.

نتایج و بحث

ساختار سلولی

شکل ۲ مقطع عرضی نمونه‌ها را نشان می‌دهد، همان‌طور که مشاهده می‌شود ساختار سلولی منظم، یکپارچه و با پیوند مناسب در فصل مشترک کاملاً مشخص است. تحقیقات نشان داده است که ساختار بی‌قاعده سلول‌ها و دیواره‌های دنداندار، چقرمگی و استحکام فوم‌های فلزی را کاهش خواهد داد [۹ و ۱۰]. استفاده از کره‌های تو خالی، منجر به بهبود شکل نامنظم و بی‌قاعده‌ی سلول‌ها و دیواره آنها شده است، در این شرایط انتظار می‌رود که از تمرکز تنش در مکان‌های خاص جلوگیری شود.

چگالی

چگالی تئوری و چگالی عملی در جدول ۲ نشان داده شده است. مقادیر نشان داده شده بیانگر تطابق خوب بین چگالی تئوری و عملی است. متوسط چگالی نمونه‌های شامل کره‌های فولاد زنگ نزن $2/01 \text{ g/cm}^3$ و متوسط آن برای نمونه‌های شامل کره‌های کم‌کربن $2/06 \text{ g/cm}^3$ تعیین شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود چگالی فوم کامپوزیتی حاصل نسبت به ماده زمینه (آلومینیوم A356) که

دارای چگالی برابر $2/67 \text{ g/cm}^3$ می‌باشد، کاهش قابل توجهی داشته است (در حدود ۲۵٪). قطر و ضخامت دیواره کره‌های تو خالی عواملی هستند که بر روی چگالی فوم تاثیرگذارند. با افزایش قطر کره و یا کاهش ضخامت دیواره، چگالی فوم کاهش می‌یابد.

خواص مکانیکی فوم فلزی، تابعی از چگالی نسبی می‌باشد. در یک ماده فومی، کاهش چگالی منجر (به علت کاهش ماده متراکم) به کاهش استحکام فشاری و قابلیت جذب انرژی می‌شود. با توجه به جدول ۲، با افزایش چگالی نسبی، تنش پایا افزایش می‌یابد.

آزمون فشار

قابلیت جذب انرژی و تحمل کرنش زیاد (۵۰ تا ۶۰٪) فوم‌های کامپوزیتی در یک تنش نسبتاً ثابت، آنها را برای کاربردهایی که احتیاج به جذب انرژی زیادی دارند، مناسب خواهد کرد [۱۱].

آزمون‌های فشار تک محوره، برای بررسی خواص فوم‌های کامپوزیتی تولید شده، بر روی نمونه‌های استوانه-ای شکل که بنابر استاندارد آزمون فوم‌ها باید نسبت ارتفاع به قطر در حدود ۲-۱/۵ داشته باشند و همچنین در هر ضلع حداقل ۸ تا ۱۰ سلول داشته باشند، انجام شد [۹].

میزان کرنش از طریق اندازه‌گیری جابجایی پانچ دستگاه به هنگام اعمال فشار بر روی نمونه‌ها محاسبه گردید. بر روی قاعده‌های نمونه که در تماس با پانچ دستگاه بودند، برای جلوگیری از تاثیر اصطکاک، نوار تفلون قرار داده شد.

شکل ۳ نمودار تنش-کرنش مهندسی، با سه ناحیه مجزا، را نشان می‌دهد. ناحیه الاستیک خطی تا حدود ۹٪ کرنش، ناحیه‌ی مسطح در یک تنش نسبتاً ثابت با تغییر فرم پلاستیک زیاد و ناحیه‌ی چگال شدن^۱ نمونه در مرز کرنش حدود ۶۰٪، که در این ناحیه فوم فلزی مانند فلز زمینه (یک ماده متراکم) رفتار می‌کند. سطح زیر منحنی تنش-کرنش قبل از شروع ناحیه چگال شدن نمونه به عنوان کل انرژی جذب شده توسط نمونه در نظر گرفته

¹ - Densification

نحوه شکست^۱ فوم‌های تولیدی

شکست فوم‌های کامپوزیتی با از بین رفتن و شکسته شدن پیوند بین زمینه و کره‌های فلزی در نقاط مرزی همراه می‌باشد. نتایج آزمون میکروسختی و تصاویر میکروسکوپ الکترونی حکایت از وجود یک فاز بین فلزی با سختی بالا، ترد و شکننده در نواحی مرزی دارد که می‌تواند محل مناسبی برای جوانه زنی ترک و شروع شکست ماده از این نواحی باشد [۱۴]. پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد [۱۵] که شکست از فازهای بین فلزی آغاز می‌شود. شکل ۷ نشان دهنده جدایش و رشد ترک در ناحیه فصل مشترک و اطراف کره‌های تو خالی می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود رشد ترک منجر به شکست، فقط به اطراف کره‌ها محدود می‌شود که این مسئله وجود یک فاز ترد در ناحیه فصل مشترک را نشان می‌دهد.

نتیجه گیری

فوم کامپوزیتی زمینه فلزی به روش ریختگری گرانشی تولید شد و ساختار و خواص مکانیکی آن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش‌ها، نشان دهنده خواص ویژه و برتر فوم کامپوزیتی نسبت به سایر فوم‌های آلومینیومی سلول باز است. فوم کامپوزیتی آلومینیوم- فولاد تحت اعمال نیروی فشاری، خواص ویژه الاستیک- پلاستیک از خود نشان می‌دهد، یک ناحیه الاستیک اولیه که با افزایش نیرو، شروع به تغییر فرم پلاستیک تحت تنش نسبتاً ثابت می‌کند. نتایج نشان داد، این فوم کامپوزیتی در مقایسه با فوم‌های آلومینیومی تجاری از نسبت استحکام به چگالی و قدرت جذب انرژی ۶-۸ برابری، برخوردار است. تصاویر میکروسکوپی نشان دهنده پیوند مناسب بین زمینه آلومینیومی و کره‌های فولادی است. افزایش سختی در نواحی مرزی، گواه از تشکیل یک فاز سخت می‌دهد که پیش بینی می‌شود، یکی از ترکیبات بین فلزی آلومینیوم- آهن باشد.

می‌شود [۱۲]. در این تحقیق دو نمونه کامپوزیتی با کره‌های فولاد زنگ نزن و دو نمونه کامپوزیتی حاوی فولاد کم کربن مورد آزمایش قرار گرفتند. همانطور که در تصویر مشخص است، فوم کامپوزیتی متشکل از کره‌های تو خالی دارای سطح زیر منحنی بیش‌تری نسبت به فوم‌های معمولی (جهت مقایسه، منحنی تنش- کرنش دو نمونه از فوم‌های آلومینیومی سلول باز نیز در شکل ۵ آورده شده است [۱۳]) می‌باشد. لذا قابلیت جذب انرژی بالاتری دارند. شکل ۴ تصاویر نمونه‌های کره‌های فولادی قبل و بعد از تغییر فرم را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود تغییر شکل در تمام سلول‌ها تقریباً یکسان است و تغییر شکل ترجیحی در سلولی خاص مشاهده نمی‌شود.

شکل ۵ نشان دهنده مقایسه‌ای از انرژی جذب شده در فوم‌های کامپوزیتی آلومینیومی در مقایسه با سایر فوم‌های آلومینیومی است. با وجود چگالی بیش‌تر فوم‌های کامپوزیتی، این نوع فوم از نسبت استحکام به چگالی بالاتری در مقابل سایر فوم‌ها با اندازه سلول و ماده یکسان برخوردار است (همانطور که در جدول ۲ نشان داده شد).

فوم‌های کامپوزیتی با کره‌های تو خالی هنگام اعمال نیرو، تغییر فرم نسبتاً یکنواختی از خود نشان می‌دهند در حالیکه فوم‌های معمولی (با سلول‌های باز) دچار کرنش موضعی توأم با تغییر شکل و شکست ترجیحی در سلول‌های بزرگ می‌شوند [۱۴].

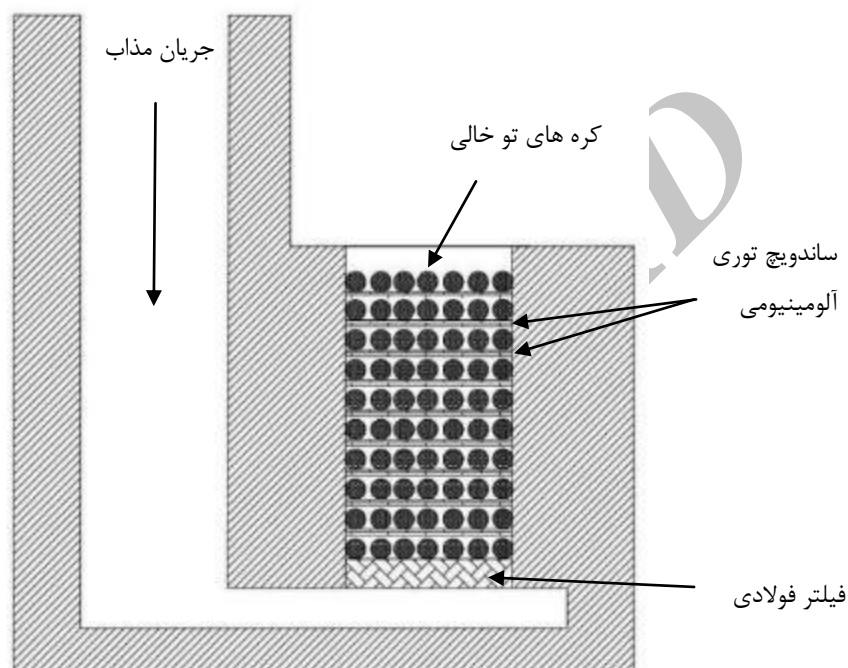
آزمون میکروسختی

نتایج آزمون میکروسختی در جدول ۳ آورده شده است. به علت کوچک بودن سلول‌ها و فازهای احتمالی تشکیل شده در نواحی مرزی، تخمین دقیق میکروسختی امکان پذیر نمی‌باشد. با این حال در انجام این آزمون‌ها سعی بر آن شده بود که سختی نواحی مرزی با دقت اندازه‌گیری شود. اختلاف زیاد سختی در بعضی نقاط مرزی با زمینه آلومینیومی حاکی از آن است که در نواحی مرزی یک فاز بین فلزی سخت تشکیل شده است. تصاویر میکروسکوپ الکترونی در مرز مشترک بین آلومینیوم و کره‌های فولادی این ادعا را تصدیق می‌کند (شکل ۶).

¹ - Failure

جدول ۱- ترکیب شیمیایی گلوله‌های توخالی فولادی و زمینه آلومینیومی به کار رفته در تهیه فوم کامپوزیتی.

جنس ماده گلوله ها و زمینه	ترکیب شیمیایی
گلوله های فولاد کم کربن	<0.007% C, 0.002% O and balance iron
گلوله های فولاد ضد زنگ 316L	0.03% C, 0.3% O, 17% Cr, 13% Ni, 0.9% Si, 0.2% Mn, 2.2% Mo, bal-Fe
آلومینیوم A356	7.01% Si, 0.5% Fe, 0.39% Mg, 0.28% Mn, 0.11% Cu, 0.09% Ti, 0.06% Zn, 0.02% Cr, balance-Al



شکل ۱- شماتیک قالب ریخته گری مورد استفاده در تولید فوم.

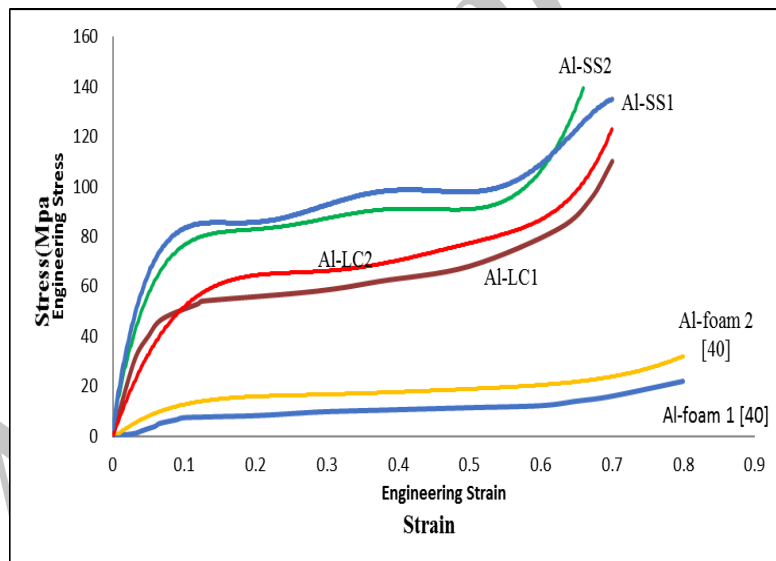


شکل ۲- تصویر محل اتصال دیواره کره‌های توخالی فولادی و زمینه آلومینیومی.

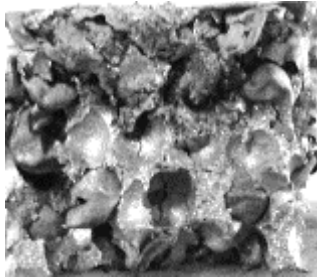
جدول ۲- مقایسه‌ی خواص فیزیکی و مکانیکی فوم ساخته شده با استفاده از کره‌های تو خالی و فوم آلومینیومی

ویژگی مواد ^۱	زمینه آلومینیوم-کره‌های توخالی فولادزنگ نزن	زمینه آلومینیوم-کره‌های فوم آلومینیومی [۱۲]
قطر داخلی (mm)	۴	۵
ضخامت دیواره (mm)	۰/۲۲	۰/۲۷
تخلخل دیواره ^۲ (%)	۵	۷
چگالی تئوری ^۳ (g/cm ³)	۱/۹۴	۱/۸۷
چگالی عملی (g/cm ³)	۲/۰۶	۲/۰۱
چگالی نسبی ^۴ (%)	۷۱	۷۴
تنش پایا (MPa)	۷۵	۹۷
کرنش تراکم (%)	۴۵	۵۶
نسبت استحکام پایا به دانسیته ((MPa/(g/cm ³))	۳۶/۴	۴۴/۴۹
انرژی جذب شده در ۵۰٪ کرنش (MJ/m ³)	۲۲/۷۵	۳۵

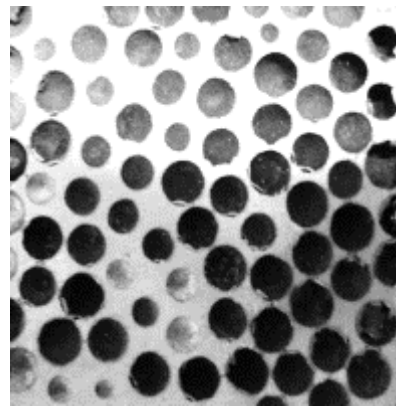
- ۱- اعداد نشان داده شده، مقادیر میانگین چند نمونه است.
- ۲- تخلخل دیواره کره‌های تو خالی صرف نظر شد.
- ۳- چگالی تئوری با در نظر گرفتن پیوند ایدال بین کره‌های فولادی تو خالی و زمینه آلومینیومی محاسبه شد.
- ۴- چگالی آلومینیوم مبنای محاسبه چگالی نسبی در نظر گرفته شده است.



شکل ۳- نمودار تنش-کرنش حاصل از آزمون فشار نمونه های تولید شده.

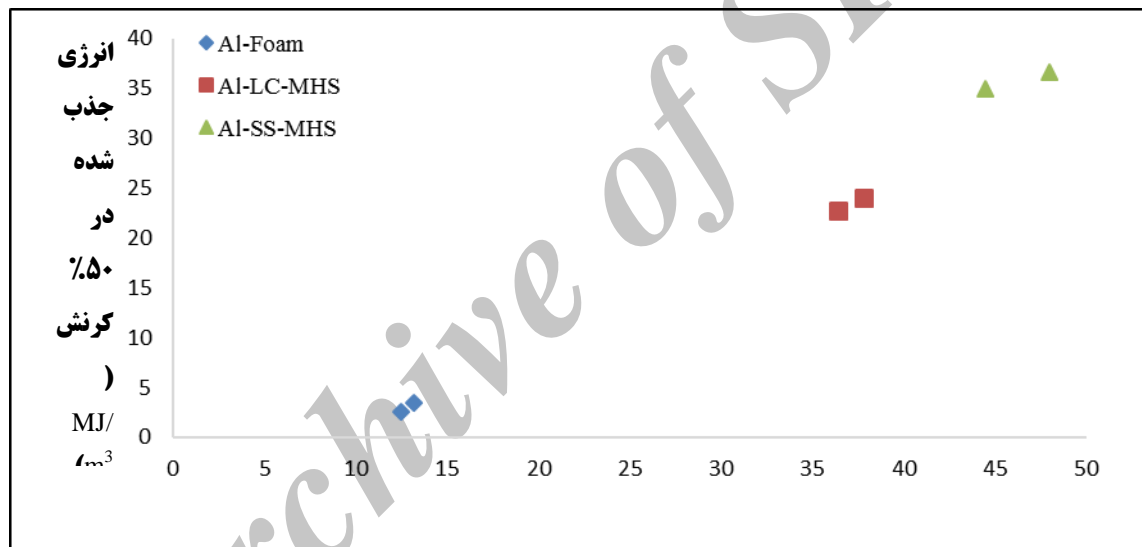


ب



الف

شکل ۴- مقطع نمونه شامل گلوله های فولاد کم کربن (الف) قبل از انجام آزمون فشار (ب) بعد از انجام آزمون و ۷۰ درصد کرنش.



شکل ۵- مقایسه جذب انرژی به عنوان تابعی از نسبت استحکام به چگالی

(Al-Low Carbon Hollow Sphere Foam)

(Al-Stainless Steel Hollow Sphere Foam)

Al-SS-MHS-2

Al-SS-MHS-1

Al-LC-MHS -2

Al-LC-MHS -1

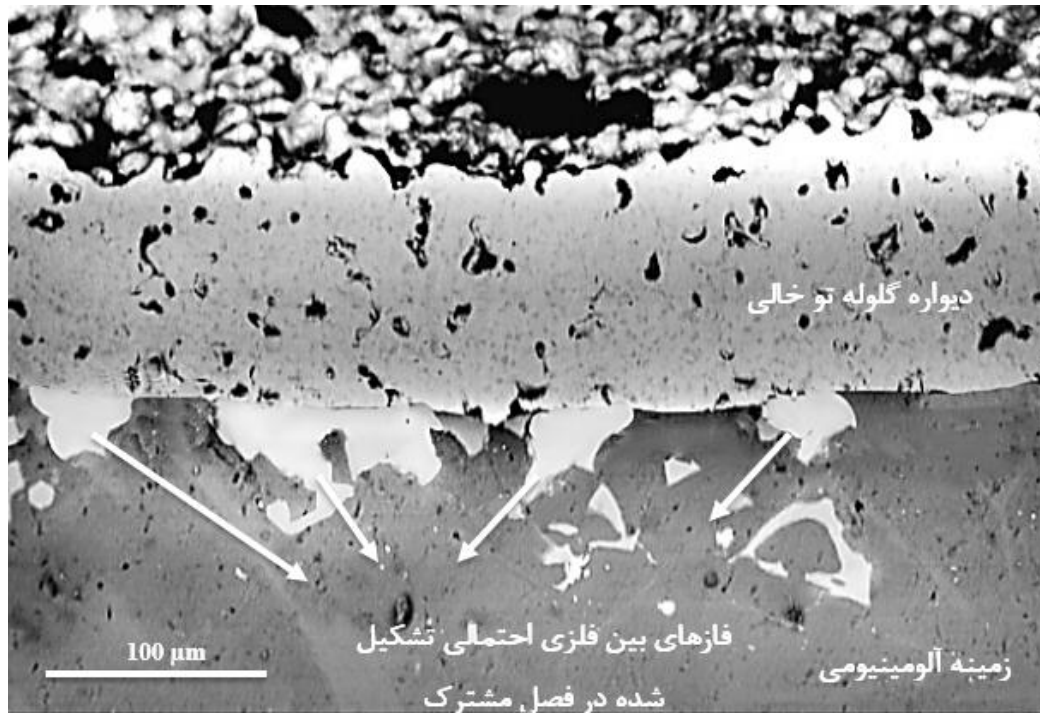
Al-Foam-2

Al-Foam-1

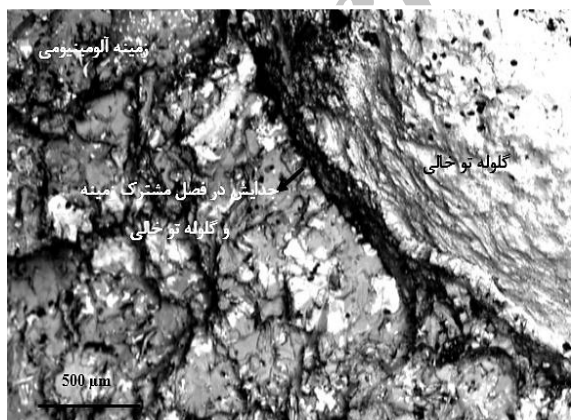
نسبت استحکام پایا به دانسیته ((PMA/(g/cm³))

جدول ۳- میانگین نتایج آزمون میکروسختی.

سختی متوسط زمينه	سختی متوسط نواحی مرزی	سختی متوسط دیواره گلوله ها	سختی (ویکرز) / جنس کره های توخالی
۵۰/۲	۱۴۶/۱۴	۸۶/۷	نمونه شامل گلوله های فولاد کم کربن
۵۰/۵	۲۶۲/۳	۱۸۴/۲	نمونه شامل گلوله فولاد ضد زنگ



شکل ۶: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از فصل مشترک گلوله های تو خالی و زمينه آلومینیومی



شکل ۷- جدایش و رشد ترک در ناحیه فصل مشترک زمينه و گلوله های تو خالی.

Reference

1. م. گلستان پور و همکاران، "بررسی جذب انرژی پنبل های ساندویچی با هسته فوم آلومینیوم تحت آزمون سوراخکاری"، نشریه مواد نوین، جلد ۳، شماره ۲، ص ۲۵-۳۸، زمستان ۹۱.
2. HP. Degischer, B. Kriszt, Handbook of Cellular metals, Production, Processing, Applications, pp.25, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Austria, 2002.
3. E. Baumeister, S. Klaeger and A. Kaldos, "Lightweight, hollow-sphere-composite (HSC) materials for mechanical engineering applications", Journal of Materials Processing Technology, pp. 155–156, 2004.
4. J. A. Cochran, "Ceramic hollow spheres and their applications", Solid State & Materials Science, vol 3, pp.474-479, 1998.
5. L.J. Gibson, MF. Ashby, Cellular solids: Structures and Properties, edn 2, Cambridge University Press Cambridge, 1997.
6. C. Augustin, U. Wolfgang Hungerbach, "Production of hollow spheres (HS) and hollow sphere structures (HSS)", Materials Letters, Vol 63, 2009.
7. B.P. Neville, A. Rabiei, "Composite metal foams processed through powder metallurgy", Materials and Design Vol 29, 388–396, 2008.
8. M.F. Ashby, A. Evans, N.A. Fleck, L.J. Gibson, J.W. Hutchinson, H.N.G. Wadley, Metal Foams, A Design Guide, Massachusetts, Butterworth-Heinemann, pp. 27, 2000.
9. G. Stephani, U. Waag, P. Lothman, O. Andersen, L. Schneider, F. Bretschneider and H. Schneidereit, "New Lightweight Structures based on Low-cost Metallic Hollow Spheres", Proceedings of International Conference on Powder Metallurgy and Particulate Materials, NY, 2000.
10. J. Banhart, "Manufacture, characterization and application of cellular metals and metal foams", Progress in Materials Science, Vol 46, pp. 559–632, 2001.
11. A. Rabiei, L.J. Vendra, "A comparison of composite metal foam's properties and other comparable metal foams", Materials Letters, Vol 63, pp. 533–536, 2009.
12. NEVILLE, BRIAN PATRICK. Processing and development of an Ultra-Light, High Strength Material through Powder Metallurgy, North Carolina, North Carolina State University, 2006.
13. Lakshmi J. Vendra, Afsaneh Rabiei, "A study on aluminum–steel composite metal foam processed by casting", Materials Science and Engineering, Vol 465, pp. 59–67, 2007.
14. L. J. Vendra, J. A. Brown, A. Rabiei, "Effect of processing parameters on the microstructure and mechanical properties of Al–steel composite foam", Journal of Material Science, Vol 46, pp.34 2011.
15. J.A. BROWN, L.J. VENDRA, and A.RABIEI, "Bending Properties of Al-Steel and Steel-Steel Composite Metal Foams", The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International, Vol 41, pp 2785-2793, 2010.