بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده فنی و مهندسی
بخش مهندسی مواد

پایان‌نامه کارشناسی ارشد

عنوان پایان‌نامه

بررسی فوم‌پذیری و خواص فشاری فوم‌های آلیاژهای Zn-Al ساخته شده به روش ذوبی

نام دانشجو

اصغر حیدری آستارایی

استاد راهنما:

دکتر حمیدرضا شاهوردی

شهریور ۹۱

بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان نامه

آقای اصغر حیدری آستارائی پایان نامه ٦ واحدی خود را **با عنوان بررسی فوم پذیری وخواص فشاری فوم های آلیاژهای Zn-AL ساخته شده به روش ذوبی** در تاریخ ۱۳۹۱/٦/۲۰ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این پایان نامه را از نظر فرم و محتوا تایید کرده و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد مهندسی مواد - شناسائی پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر حمید رضا شاهوردی	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر فرشید مالك قائینی	استادیار	
استاد ناظر	دکتر رضا میراسمعیلی	استادیار	
استاد ناظر	دکتر سیدحسین رضوی	استادیار	
مدیر گروه (یا نماینده گروه تخصصی)	دکتر فرشید مالك قائینی	استادیار	

آیین‌نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی و فناوری دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیأت علمی، دانشجویان، دانش‌آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد زیر را رعایت نمایند:

ماده ۱- حق نشر و تکثیر پایان نامه/ رساله و درآمدهای حاصل از آنها متعلق به دانشگاه می باشد ولی حقوق معنوی پدید آورندگان محفوظ خواهد بود.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان‌نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و با تایید استاد راهنمای اصلی، یکی از اساتید راهنما، مشاور و یا دانشجو مسئول مکاتبات مقاله باشد. ولی مسئولیت علمی مقاله مستخرج از پایان نامه و رساله به عهده اساتید راهنما و دانشجو می باشد.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش‌آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه/ رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب، نرم افزار و یا آثار ویژه (اثری هنری مانند فیلم، عکس، نقاشی و نمایشنامه) حاصل از نتایج پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی کلیه واحدهای دانشگاه اعم از دانشکده ها، مراکز تحقیقاتی، پژوهشکده ها، پارک علم و فناوری و دیگر واحدها باید با مجوز کتبی صادره از معاونت پژوهشی دانشگاه و براساس آئین نامه های مصوب انجام شود.

ماده ٤- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه یافته ها در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق معاونت پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ٥- این آیین‌نامه در ٥ ماده و یک تبصره در تاریخ۸۷/٤/۱ در شورای پژوهشی و در تاریخ ۸۷/٤/۲۳ در هیأت رئیسه دانشگاه به تایید رسید و در جلسه مورخ ۸۷/۷/۱۵ شورای دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب در شورای دانشگاه لازم‌الاجرا است.

«اینجانب اصغر حیدری آستارائی دانشجوی رشته مهندسی مواد-شناسایی و انتخاب مواد مهندسی ورودی سال تحصیلی ۹۰-۸۹ مقطع کارشناسی ارشد دانشکده فنی و مهندسی متعهد می شوم کلِیه نکات مندرج در آئین نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهش‌های علمی دانشگاه تربیت مدرس را در انتشار یافته های علمی مستخرج از پایان نامه تحصیلی خود رعایت نمایم. در صورت تخلف از مفاد آئین نامه فوق الاشعار به دانشگاه وکالت و نمایندگی می دهم که از طرف اینجانب نسبت به لغو امتیاز اختراع بنام بنده و یا هر گونه امتیاز دیگر و تغییر آن به نام دانشگاه اقدام نماید. ضمناً نسبت به جبران فوری ضرر و زیان حاصله بر اساس برآورد دانشگاه اقدام خواهم نمود و بدینوسیله حق هر گونه اعتراض را از خود سلب نمودم»

امضا: .....

تاریخ: ۹۱/۶/۳۱.....

آیین نامه چاپ پایان‌نامه (رساله)های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله)های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه،دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می‌شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله)ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان نامه کارشناسی ارشد/ رساله دکتری نگارنده در رشته مهندسی مواد- شناسایی و انتخاب مواد مهندسی است که در سال ۱۳۹۱ در دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی سرکار خانم/جناب آقای دکتر حمید رضا شاهوردی از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه‌های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت‌چاپ) را به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر درمعرض فروش قرار دهد.

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت‌مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می‌دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب اصغر حیدری آستارایی دانشجوی رشته مهندسی مواد- شناسایی و انتخاب مواد مهندسی مقطع کارشناسی ارشد تعهد فوق وضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: اصغر حیدری آستارایی

تاریخ و امضا: ۹۱/۶/۳۱

تقدیم به

پدر و مادر عزیز و مهربانم

که همواره حامی من بوده اند

سپاس گزاری

برخود لازم می دانم از زحمات بی شائبه ی استاد محترم جناب آقای دکتر حمیدرضا شاهوردی که از ابتدای کار تا پایان با حمایت ها و دقت نظر خود موجب باور شدن و به نتیجه رسیدن این پروژه شدند، سپاس گزاری کنم.

از پدر و مادرم که در تمامی لحظات زندگی، به ویژه در مسیر گذراندن دوره کارشناسی ارشد و انجام پایان نامه، حامی و مشوق من بوده و با صبرشان این مسیر دشوار را هموار کرده اند، تشکر ویژه و صمیمانه دارم و از اینکه در این دوره نتوانستم به طور شایسته در کنار آنها باشم، از آنها دلجویی می نمایم.

در پایان از تمامی دوستان بویژه آقایان مهندس الهی و مجاور بخاطر مساعدت ها و کمک در انجام آزمون ها تشکر و قدردانی می نمایم.

چکیده

پژوهش حاضر به منظور بررسی فوم‌پذیری آلیاژهای Zn-Al با درصدهای متداول Al و سپس ارزیابی خواص فشاری شبه استاتیک فوم‌های تولیدی تعریف و اجرا گردید. بدین منظور، فوم‌های روی خالص و آلیاژهای Zn-Al با نام‌های متداول: آلیاژ شماره ۵ (۴٪Al)، ZA12، Zn-22Al و ZA27 به روش فوم‌سازی ذوبی و با استفاده از حباب‌زای ZrH_2 تولید شدند. از روش‌های افزودن کلسیم و همزدن مذاب و نیز تلفیق این دو روش برای ویسکوزسازی مذاب آلیاژهای Zn-Al و کمک به پایداری فوم مذاب بهره گرفته شد. آزمایش‌های ویسکومتری بر پایه سنجش زمان سقوط گلوله فولادی در مذاب اجرا گردید تا درک عمیق‌تری از اختلاف موجود میان انواع روش‌های ویسکوزسازی حاصل شود. ریزساختار فوم‌ها توسط آنالیز میکروسکوپی مورد بررسی قرار گرفته و فازهای موجود توسط پراش پرتوی x شناسایی شدند. خواص فشاری تک محوری فوم‌ها در محدوده شبه استاتیک مورد بررسی قرار گرفته و ویژگی‌های تغییرشکل آن‌ها مطالعه شد.

نتایج نشان داد که تغییر مقدار Al آلیاژهای Zn-Al، منجر به بروز رفتارهای متفاوتی از آن‌ها در قبال روش‌های ویسکوزسازی اعمال شده می‌شود. با این حال، با بکارگیری روش‌های مختلف ویسکوزسازی و انتخاب دمای فوم‌سازی مناسب، امکان تولید فوم پایدار با بازدهی بسیار خوب برای روی و آلیاژهای Zn-Al وجود دارد. بررسی خواص فشاری فوم‌ها نشان داد که فوم‌های روی و آلیاژهای Zn-Al دارای رفتار تنش- کرنش فشاری مشابه با فوم‌های سلول بسته می‌باشند. هم‌چنین، مشخص گردید که رفتار تغییرشکل فشاری فوم‌های روی و آلیاژهای Zn-Al در دمای محیط، ترد بوده و مکانیزم اصلی تغییرشکل این فوم‌ها شکست دیواره می‌باشد. با تغییر مقدار Al آلیاژ ماده دیواره، استحکام و مدول الاستیک فشاری فوم‌ها تغییرات غیر منتظره‌ای را از خود نشان می‌دهند.

کلمات کلیدی: فوم‌پذیری، ویسکوزیته، خواص فشاری، روی خالص، آلیاژهای Zn-Al، استحکام فشاری، مدول الاستیسیته

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست اشکال ..... **ه**

فهرست جداول ..... **ح**

علائم و نشانه‌ها ..... **ط**

فصل ۱ : مقدمه **۱**

فصل ۲ : مروری بر منابع **۶**

۲-۱ مقدمه ۷

۲-۲ تاریخچه ۷

۲-۳ تعریف فوم فلزی ۷

۲-۴ روش‌های تولید فوم‌های فلزی ۱۱

۲-۵ فوم‌پذیری ۱۲

۲-۵-۱ تخلخل یا انبساط خطی ۱۳

۲-۵-۲ پایداری فوم ۱۳

۲-۵-۳ کیفیت فوم ۱۵

۲-۶ عوامل مؤثر بر فوم‌پذیری ۱۵

۲-۶-۱ نرخ تجزیه و مقدار حباب‌زا ۱۶

۲-۶-۲ اثر ویسکوزیته بر فوم‌پذیری ۱۶

۲-۶-۳ شرایط انجماد ۱۸

۲-۸ عوامل ساختاری مؤثر بر خواص مکانیکی فوم‌های فلزی ۱۹

۲-۹ خواص فشاری فوم‌های فلزی ۲۰

۲-۹-۱ مکانیزم‌های تغییرشکل فوم‌های آلومینیم ۲۱

۲-۹-۲ معیار استحکام فشاری ۲۱

۲-۹-۳ مدول الاستیک ۲۳

۲-۹-۴ معیار کرنش تراکم ۲۳

۲-۹-۵ تغییرپذیری خواص فشاری ۲۵

۲-۹-۶ اثر نرخ کرنش بر استحکام فشاری و جذب انرژی ۲۶
۲-۹-۷ اثر قطر سلول بر خواص فشاری ۲۷
۲-۹-۸ اثر اندازه ۲۷
۲-۹-۹ اثر ابعاد نمونه ۲۸
۲-۱۰ مدل‌سازی خواص مکانیکی فوم‌های فلزی ۲۸
۲-۱۱ روی و آلیاژهای Zn-Al ۳۲
۲-۱۱-۱ سیستم آلیاژی Zn-Al ۳۳
۲-۱۲ فوم‌های آلیاژهای روی ۳۴
فصل ۳ : مواد و روش انجام آزمایش ۴۰
۳-۱ مواد اولیه ۴۱
۳-۲ آنالیز حرارتی حباب‌زا ۴۲
۳-۳ ساخت فوم‌ها ۴۳
۳-۳-۱ تخمین محدوده دمایی مناسب فوم‌سازی ۴۵
۳-۳-۲ عملیات ویسکوزسازی مذاب ۴۶
۳-۳-۲-۱- روش افزودن کلسیم ۴۶
۳-۳-۲-۲- روش همزدن مذاب ۴۷
۳-۳-۲-۳- روش افزودن کلسیم و همزدن ۴۷
۳-۳-۳ تولید فوم ویسکوز نشده ۴۷
۳-۴ مشخصات فوم‌ها ۴۸
۳-۵ آزمایش‌های اندازه‌گیری ویسکوزیته ۴۹
۳-۶ چگالی سنجی ۵۱
۳-۷ بررسی‌های ساختاری ۵۲
۳-۷-۱ بررسی فوم‌پذیری ۵۲
۳-۸ بررسی‌های ریزساختاری ۵۲
۳-۸-۱ بررسی‌های نوری ۵۲
۳-۸-۲ بررسی‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی ۵۳
۳-۹ آزمون پراش پرتوی x ۵۳

۳-۱۰ آزمون خواص فشاری ۵۳

فصل ۴ : نتایج و بحث ۵۵

۴-۱ ترکیب شیمیایی آلیاژها ۵۶

۴-۲ چگالی آلیاژها ۵۶

۴-۳ تجزیه حرارتی حباب‌زاها ۵۷

۴-۴ تخمین دمای مناسب فوم‌سازی ۵۹

۴-۵ فوم‌ها ۶۱

۴-۵-۱ فوم روی خالص ویسکوز نشده ۶۱

۴-۵-۲ فوم‌های پایدار شده با کلسیم ۶۲

۴-۵-۳ فوم‌های همزده ۶۳

۴-۵-۴ فوم‌های Zn-Al-Ca همزده ۶۵

۴-۵-۵ فوم‌پذیری آلیاژهای Zn-Al ۶۷

۴-۶ بررسی ریزساختار فوم‌ها ۶۸

۴-۶-۱ ریزساختار فوم Zn-Ca ۶۸

۴-۶-۲ ریزساختار فوم‌های همزده ۷۰

۴-۶-۳ ریزساختار فوم‌های ZA-Ca ۷۲

۴-۷ آزمایش‌های اندازه‌گیری ویسکوزیته ۷۵

۴-۷-۱ ویسکوزیته آلیاژهای Zn-Al ۷۵

۴-۷-۲ اثر کلسیم بر ویسکوزیته آلیاژهای Zn-Al ۷۶

۴-۷-۳ اثر همزدن بر ویسکوزیته آلیاژهای Zn-Al-Ca ۷۸

۴-۷-۴ اثر همزدن بر ویسکوزیته آلیاژهای Zn-Al ۸۰

۴-۷-۵ اثر ویسکوزیته بر فوم‌پذیری ۸۰

۴-۸ خواص فشاری ۸۱

۴-۸-۱ رفتار تنش- کرنش فشاری ۸۱

۴-۸-۲ مکانیزم‌های تغییرشکل ۸۴

۴-۸-۳ استحکام فشاری ۸۸

۴-۸-۴ مدول الاستیسیته ۹۳

فصل ۵ : نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۹۸

۵-۱ نتیجه‌گیری ۹۹

۵-۲ پیشنهادات ۱۰۱

فهرست منابع ۱۰۲

پیوست‌ها ۱۰۷

فهرست اشکال

شکل ۲-۱ رادیوسکوپی فوم آلومینیمی نشان دهنده ساختار چند وجهی فوم [۵] ۸

شکل ۲-۲ الف) شماتیک سلول یا حباب فوم به همراه اجزا آن ب) سلول‌های ایده‌آل Tetrakaidecahedra [۵] ۹

شکل ۲-۳ فوم آلومینیمی تر (چپ) و خشک (راست) تولید شده توسط ذوب فشردان پودری[۵] ۱۰

شکل ۲-۴ روش‌های ساخت فوم‌های فلزی به همراه نام تجاری برخی از محصولات فومی [۸] ۱۱

شکل ۲-۵. ساختار فوم آلپوراس (Al-Ca) الف) تصویر باینری [۹] ب) تصویر اسکن شده [۱۰] ۱۲

شکل ۲-۶ اثر زمان همزدن و مقدار کلسیم بر ویسکوزیته ظاهری مذاب آلومینیم [۱۶] ۱۷

شکل ۲-۷ منحنی تنش-کرنش فشاری تک محوری الف) شماتیک ب) نمونه فوم آلومینیم [۲۸] ۲۰

شکل ۲-۸ معیارهای مختلف استحکام فشاری فوم‌های فلزی[۳۰] ۲۲

شکل ۲-۹ منحنی تنش-کرنش فشاری تک محوری فوم آلپوراس با چگالی نسبی ۰/۱. محل برخورد خطوط نقطه چین، کرنش تراکم را نشان می‌دهد[۳۱]. ۲۴

شکل ۲-۱۰ مکانیزم‌های تغییر شکل در فوم‌های سلول بسته الف) ناحیه الاستیک خطی: خمش دیواره سلول+ انقباض لبه و کشیدگی غشا+فشار گاز داخلی ب) ناحیه پلاتو: خمش لبه‌ها و کشیدگی دیواره سلول [۵۱] ۲۹

شکل ۲-۱۱ نمودار فازی تعادلی Zn-Al [۶۰] ۳۳

شکل ۲-۱۲ ماکروساختار فوم Zn الف) TiH_2، ۴۳۰°C ب) TiH_2، ۴۵۰°C ج) MgH، ۴۳۰°C [۶۳] ۳۵

شکل ۲-۱۳ ریزساختار دیواره سلول فوم Zn22Al (الف) قبل و (ب) بعد از عملیات حرارتی [۴۷] ۳۶

شکل ۲-۱۴ منحنی تنش- کرنش فوم‌های Zn-22Al (الف) قبل و (ب) بعد از عملیات حرارتی [۴۷] ۳۶

شکل ۲-۱۵ تصویر نوری فوم سلول بسته آلیاژ Zn-22Al [۶۵] ۳۷

شکل ۲-۱۶ منحنی‌های تنش- کرنش فوم‌های Zn-22Al در چگالی‌های مختلف. نرخ کرنش= $۲/۲\times۱۰^{-۳}\ s^{-1}$ [۶۵] ۳۸

شکل ۲-۱۷ منحنی تنش-کرنش فشاری فوم ZA22/10 vol.% SiC_p [۶۶] ۳۸

شکل ۲-۱۸ اثر نرخ کرنش بر استحکام فشاری فوم‌های ZA22 در چگالی‌های نسبی مختلف [۶۴] ۳۹

شکل ۳-۱ فلوچارت فعالیت‌های تجربی پژوهش ۴۱

شکل ۳-۲ شماتیک فرایند فوم‌سازی بکار گرفته شده در این تحقیق ۴۳

شکل ۳-۳ الف) کوره الکتریکی مقاومتی ۱۲۰۰°C ب) قالب فوم‌سازی در حال پخت پوشش و پیشگرم ۴۴

شکل ۳-۴ طرح همزن مورد استفاده برای همزدن مذاب..... ۴۵
شکل ۳-۵ ویسکومتر سقوط گلوله دما بالا به همراه جعبه کنترل زمان سقوط و بوته آلومینایی به عنوان محفظه..... ۵۰
شکل ۴-۱ آنالیز حرارتی افتراقی پودر TiH_2 و ZrH_2 تحت گاز آرگون با نرخ گرمایش ۱۰ K/min..... ۵۷
شکل ۴-۲ آنالیز توزین حرارتی الف) پودر TiH_2 و ب) پودر ZrH_2 تحت گاز آرگون با نرخ گرمایش ۱۰ K/min ... ۵۹
شکل ۴-۳ اثر دمای فوم‌سازی بر فوم‌پذیری آلیاژ Zn-1Ca الف) ۴۶۰ $^{\circ}C$ ب) ۴۹۰ $^{\circ}C$ ج) ۵۲۰ $^{\circ}C$..... ۶۰
شکل ۴-۴ سطح مقطع فوم Zn خالص (۵۲۰ $^{\circ}C$)..... ۶۲
شکل ۴-۵ سطح مقطع فوم‌های ZA4-1Ca الف) ۵۰۰ $^{\circ}C$ ب) ۵۲۰ $^{\circ}C$..... ۶۳
شکل ۴-۶ سطح مقطع فوم‌های همزده Zn (الف)، ZA4. (ب) و ZA22 (ج) ساخته شده در دمای ۵۲۰ $^{\circ}C$..... ۶۴
شکل ۴-۷ سطح مقطع فوم‌های ZA12 در دمای ۵۰۰ $^{\circ}C$ (الف) و ۵۳۵ $^{\circ}C$ (ب) و فوم ZA22 (ج) در دمای ۵۲۰... ۶۵
شکل ۴-۸ الف) سطح مقطع فوم ZA27 ب) قسمت فوقانی فوم نشان دهنده وقوع پدیده انقباض انجمادی ج) سلول‌های تخریب شده. ۶۶
شکل ۴-۹ اثر دمای فوم‌سازی توسط یک درصد وزنی ZrH_2 بر چگالی نسبی فوم‌های Zn-Al در بازدهی ۱۰۰٪..... ۶۷
شکل ۴-۱۰ ریزساختار فوم Zn-1Ca الف) تصویر نوری سطح مقطع دیواره سلول ب) تصویر الکترونی لبه سلول..... ۶۹
شکل ۴-۱۱ ریزساختار فوم Zn همزده الف) تصویر نوری سطح مقطع دیواره و لبه سلول ب) تصویر الکترونی لبه سلول..... ۷۰
شکل ۴-۱۲ رگه‌های اکسید روی در زمینه روی که در اثر همزدن مذاب روی خالص ایجاد شده‌اند..... ۷۱
شکل ۴-۱۳ریزساختار اچ شده فوم ZA4 همزده ۷۱
شکل ۴-۱۴ ریزساختار آلیاژهای Zn-Al پس از افزودن یک درصد وزنی کلسیم فلزی الف) ZA4-1Ca ب) ZA12-1Ca ج) ZA22-1Ca د) ZA27-1Ca ۷۲
شکل ۴-۱۵ طرح پراش پرتوی x آلیاژهای ZA-1Ca..... ۷۳
شکل ۴-۱۶ ریزساختار لبه و دیواره (الف) و ریزساختار لبه (ب) فوم ZA12..... ۷۴
شکل ۴-۱۷ سطح مقطع دیواره فوم ZA12، نشان دهنده ذرات تشکیل شده ناشی از واکنش زیرکنیم با مذاب..... ۷۵
شکل ۴-۱۸ تغییرات زمان سقوط گلوله ویسکومتر با افزایش آلومینیم در آلیاژهای Zn-Al تحت اتمسفر محیط و دمای ۵۲۰°C. مدل نظری KTH برای ویسکوزیته آلیاژ Zn-Al در دمای ۵۲۰°C نیز نشان داده شده است.....۷۶

شکل ۴-۱۹ اثر افزودن یک درصد وزنی Ca بر زمان سقوط گلوله ویسکومتر مذاب آلیاژهای Zn-Al در دمای $520^{\circ}C$ ۷۷

شکل ۴-۲۰ تغییرات زمان سقوط گلوله ویسکومتر آلیاژهای Zn-Al در دو حالت همزدن پس از افزودن کلسیم و افزودن کلسیم پس از همزدن در دمای $520^{\circ}C$. مدت زمان همزدن ۱۲ دقیقه با سرعت rpm ۱۲۰۰. ..... ۷۹

شکل ۴-۲۱ منحنی‌های تنش- کرنش فشاری فوم Zn-1Ca در چگالی‌های نسبی مختلف ۸۱

شکل ۴-۲۲ منحنی‌های تنش- کرنش فشاری فوم Zn همزده در چگالی‌های نسبی مختلف ۸۲

شکل ۴-۲۳ منحنی‌های تنش- کرنش فشاری فوم ZA4-1Ca در چگالی‌های نسبی مختلف ۸۲

شکل ۴-۲۴ منحنی‌های تنش- کرنش فشاری فوم ZA4 همزده در چگالی‌های نسبی مختلف ۸۳

شکل ۴-۲۵ منحنی‌های تنش- کرنش فشاری فوم ZA12 در چگالی‌های نسبی مختلف ۸۳

شکل ۴-۲۶ منحنی‌های تنش- کرنش فشاری فوم ZA22 کلسیم‌دار در چگالی‌های نسبی مختلف ۸۴

شکل ۴-۲۷ منحنی‌های تنش- کرنش فشاری فوم ZA27 در چگالی‌های نسبی مختلف ۸۴

شکل ۴-۲۸ توالی تغییرشکل فشاری فوم ZA12 در کرنش‌های مختلف. الف) نمونه تغییرشکل نیافته ب) تا د) تغییرشکل در مراحل اولیه آزمون ه) تغییرشکل در کرنش ٪۱۰. ..... ۸۶

شکل ۴-۲۹ توالی تغییرشکل فشاری فوم ZA22 در کرنش‌های مختلف. الف) نمونه تغییرشکل نیافته ب) تا د) تغییرشکل در مراحل اولیه آزمون ۸۷

شکل ۴-۳۰ استحکام فشاری فوم‌های Zn و ZA4 در چگالی‌های نسبی مختلف ۸۹

شکل ۴-۳۱ استحکام فشاری فوم‌های ZA12، ZA22 و ZA27. در چگالی‌های نسبی مختلف ۹۰

شکل ۴-۳۲ روند تغییرات استحکام فشاری فوم‌های روی خالص و آلیاژهای Zn-Al ۹۱

شکل ۴-۳۳ نمونه فوم ZA12 با چگالی نسبی ۰/۰۶۸ در حال تغییرشکل فشاری در کرنش‌های مختلف. ۹۲

شکل ۴-۳۴ منحنی تنش- کرنش فوم Zn همزده با چگالی نسبی ۰/۱۶۴ (الف)۰ و فوم ZA22 با چگالی نسبی ۰/۱۲۵ (ب) در کرنش‌های بسیار کم نشان‌دهنده منحنی‌های بارگذاری و باربرداری ۹۳

شکل ۴-۳۵ مدول الاستیک باربرداری فوم‌ها در چگالی‌های نسبی مختلف ۹۶

شکل ۴-۳۶ انطباق داده‌های مدول الاستیسیته فوم‌ها با مدل‌های نظری ۹۷

فهرست جداول

جدول ۳-۱ مشخصات مواد اولیه مصرفی ۴۲

جدول ۳-۲ مشخصات و آنالیز فوم‌های ساخته شده در راستای این پژوهش ۴۸

جدول ۴-۱ ترکیب شیمیایی آلیاژها حاصل از آنالیز جذب اتمی ۵۶

جدول ۴-۲ چگالی آلیاژهای Zn-Al اندازه‌گیری شده به روش جابجایی آب ۵۶

جدول ۴-۳ دمای فوم‌سازی، چگالی، چگالی نسبی و بازدهی فوم‌های Zn-1Ca ۶۰

جدول ۴-۴ دمای فوم‌سازی، چگالی، چگالی نسبی و بازدهی فوم‌های ZA4-1Ca ۶۳

جدول ۴-۵ چگالی، چگالی نسبی و بازدهی فوم‌های همزده ۶۴

جدول ۴-۶ چگالی، چگالی نسبی، دمای فوم‌سازی و بازدهی فوم‌های Zn-Al-Ca همزده ۶۶

جدول ۴-۷ آنالیز EDS ذرات چندوجهی در ساختار فوم Zn-1Ca ۷۰

جدول ۴-۸ ترکیب شیمیایی ذرات بین فلزی $CaZn_{13}$ حاصل از آنالیز EDS ۷۳

جدول ۴-۹ مدول الاستیسیته بارگذاری، باربرداری و درصد تغییرات نسبی مدول الاستیک فوم‌ها ... ۹۴

جدول ۴-۱۰ مدول الاستیک روی و آلیاژهای Zn-Al [۵۸] ۹۷

علائم و نشانه‌ها

چگالی فوم	ρ_f
چگالی ماده دیواره	ρ_s
نیروی کشش سطحی	γ
اختلاف فشار	ΔP
شعاع	r
جرم	m
حجم	V
تخلخل	P
انبساط خطی	LE
ارتفاع نهایی	h_f
ارتفاع اولیه	h_i
بازدهی فوم	η
جرم کل	m_t
جرم منطقه عاری از حباب	m_{bfz}
حجم منطقه عاری از حباب	V_{bfz}
تنش تسلیم	σ_y
تنش تسلیم	σ_{ys}
نمای حساسیت به نرخ کرنش	m'
نرخ کرنش	$\dot{\varepsilon}$
افت تنش قله	$\Delta\sigma$
مدول الاستیک در کرنش ۰/۲٪	$E_{0.2}$
مدول الاستیک فوم	E_f
مدول الاستیک ماده دیواره	E_s
مدول الاستیک بارگذاری	E_f^l
مدول الاستیک باربرداری	E_f^u
تنش بیشینه، استحکام فشاری	σ_c
کرنش تراکم	ε_d
نسبت بعد نمونه به قطر سلول	L/d

فصل اوّل

مقدمہ

مواد فومی خانواده‌ای از مواد نو به شمار می‌روند که با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد، امکانات زیادی برای توسعه در سال‌های آینده خواهند داشت. این دسته از مواد به سه زیر گروه کلی فوم‌های پلیمری، سرامیکی و فلزی تقسیم می‌شوند. مواد فومی به ترتیب ذکر شده ناشناخته‌تر شده و کاربردهای تخصصی‌تری پیدا می‌کنند.

فوم‌های فلزی ساختارهای فلزی متخلخلی هستند که خواص معمول مواد سلولی را با خواص فلزات ترکیب می‌کنند. حفره‌های موجود تعمداً به ساختار فوم افزوده می‌شود. توجه می‌شود که فوم فلزی به فلز متخلخلی اطلاق می‌شود که لزوماً فرایند فوم شدن را طی کرده باشد.

رایج‌ترین فوم‌های فلزی را فوم‌های آلومینیمی تشکیل می‌دهند، هرچند که گسترش تدریجی کاربرد فوم‌های فلزی به سایر فلزات نظیر فولاد، آلیاژهای مس، نیکل، سرب، روی، منیزیم و تیتانیم نیز قابل پیش بینی است. نسبت استحکام به وزن و سفتی به وزن بالا و قابلیت مناسب جذب انرژی برخورد فوم‌های آلومینیمی منجر به استفاده آن‌ها در کاربردهای متنوعی خصوصاً صنعت خودرو شده است.

امروزه فوم‌های آلومینیمی توسط برخی از شرکت‌ها در جهان تولید می‌گردد. شرکت‌های شینکو وایر (Shinko Wire) ژاپن، آلولایت (Alulight) استرالیا، آلکوا (Alcoa) امریکا و چندین شرکت دیگر در کانادا، اتریش، کره و چین از جمله این شرکت‌ها می‌باشند. با این حال، اطلاعات دقیقی از حجم تولید و میزان فروش آن‌ها در دست نیست.

پژوهش در زمینه روش‌های تولید، خواص و کاربردهای فوم‌های فلزی در دهه اخیر رشد زیادی داشته است. با بررسی تعداد مقالات چاپ شده در پایگاه Scopus در زمینه فوم‌های فلزی[1] مشخص شد که تعداد مقالات علمی تا اوایل دهه ۱۹۷۰ بسیار ناچیز بوده و تا اواسط دهه ۱۹۹۰ میلادی با نرخ بسیار کمی رشد کرده است. پس از این زمان، تعداد مقالات بطور فزاینده‌ای افزایش یافته و از

[1] این بررسی با انتخاب واژه جستجوی KEY(metal* W/1 foam*) در پایگاه Scopus صورت گرفته است.

سال ۲۰۰۰ میلادی تا ۲۰۱۱، رشد متوسط سالانه ٪۲۰ داشته است.

اگرچه توسعه فوم‌های فلزی دارای تاریخچه درازمدتی است، اما هیچ‌کدام از فرایندهای تولید موجود، به سطح تکاملی قابل قیاس با فوم‌های پلیمری نرسیده است. واضح است که مشکلاتی در یافتن کاربردهای فوم فلزی در بازارهای جاویژه[1] وجود دارد. ناکارآمدی تکنیک‌های مختلف فوم سازی در سطوح متعددی یافت می‌شود که از آن جمله می‌توان به محدودیت در ساخت فوم‌هایی با کیفیت ثابت، کافی نبودن دانش خواص، کافی نبودن سطح خواص فیزیکی، عدم درک صحیح و کامل رابطه میان مورفولوژی و خواص مکانیکی، عدم انتقال نتایج تحقیق به مهندسین طراح و هزینه بالا اشاره کرد.

همانطور که در بالا اشاره شد، یکی از سطوح ناکارآمدی فوم‌های فلزی خصوصاً فوم‌های آلومینیمی این است که خواص فیزیکی آن‌ها به اندازه لازم، خوب و مناسب نبوده و در مقایسه با رقبای خود ضعیف‌تر عمل می‌کنند. بنابراین، بهبود خواص از طریق بهینه‌سازی فرایندهای تولید و انتخاب مواد هنوز احساس می‌گردد. در میان مواد فلزی مختلف، آلیاژهای آلومینیم و روی از بیشترین میزان فوم‌پذیری برخوردار بوده‌اند. با اینکه بیشترین سهم تحقیقات در زمینه فوم‌های فلزی، به آلیاژهای آلومینیم اختصاص یافته است، بنا به دلائل ذکر شده، تحقیقات در زمینه فوم‌های ساخته شده از آلیاژهای روی نیز می‌تواند مفید واقع شود.

آلیاژهای روی به ویژه آلیاژهای روی- آلومینیم دارای چندین مزیت نسبت به آلیاژهای آلومینیم می‌باشند. این آلیاژها دارای نقطه ذوب و دمای کاری پایین‌تری نسبت به آلیاژهای آلومینیم بوده و استحکام ریختگی بالایی از خود نشان می‌دهند. هم‌چنین این آلیاژها نسبت به آلیاژهای آلومینیم دارای خواص میرائی ارتعاش بهتری (۲ تا چند ده برابر بسته به فرکانس و دما) بوده و رسانایی حرارتی و الکتریکی آن‌ها نیز ٪۲۰-۱۰ کمتر است. بطور خلاصه می‌توان گفت تولید فوم

[1] niche