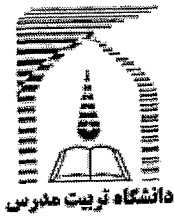


1990



۹۳۰۲۷۱



دانشکده فنی و مهندسی - بخش مواد - گروه شناسایی و انتخاب مواد

پایان نامه کارشناسی ارشد

تحت عنوان :

بررسی سینتیک تجزیه عامل حباب زای هیدراید تیتانیم در تماس با

آلومینیم مذاب

ارائه کننده:

علیرضا باقری

استاد راهنما:

دکتر حمیدرضا شا هوردی

استاد مشاور:

دکتر مهدی دیواندری

خرداد ۸۶

۹۳۲۶۸

کتابخانه تخصصی مواد  
تربیت مدرس

۱۳۸۷ / ۱۲ / ۱۵

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


مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی 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 هیات علمی، دانشجویان، دانش‌آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عنوان پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد ذیل را رعایت نمایند:

ماده ۱- حقوق مادی و معنوی پایان‌نامه‌ها / رساله‌های مصوب دانشگاه متعلق به دانشگاه است و هرگونه بهره‌برداری از آن باید با ذکر نام دانشگاه و رعایت آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های مصوب دانشگاه باشد.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان‌نامه / رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی می‌باید به نام دانشگاه بوده و استاد راهنما نویسنده مسئول مقاله باشند. 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 حاصل از نتایج پایان‌نامه / رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی دانشگاه باید با مجوز کتبی صادره از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه و براساس آیین‌نامه‌های مصوب انجام می‌شود. ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه 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 حوزه پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این دستورالعمل در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۱۳۸۴/۴/۲۵ در شورای پژوهشی دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب لازم‌الاجرا است و هرگونه تخلف از مفاد این دستورالعمل، از طریق مراجع قانونی قابل پیگیری خواهد بود.



تقدیم به

پدر و مادر بزرگوارم

همسر مهربانم

و دختر عزیزم

## تشکر و قدردانی :

سپاس کردگار بی‌همتای را که مرا در انجام این پایان‌نامه یاری نمود.  
لازم می‌دانم مراتب سپاسگزاری خود را به عزیزانی که در انجام این پروژه همواره از همفکری و همکاری ایشان برخوردار بوده‌ام ابراز نمایم :

استاد راهنمای بزرگوام جناب آقای دکتر حمیدرضا شاهرودی که در راستای انجام این تحقیق همواره از راهنمایی‌هایشان بهره‌مند بودم.

استاد مشاور گرانقدر جناب آقای دکتر مهدی دیواندری

آقای مهندس علی رسولی

آقای مهندس عبدالحمید رضایی مسئول محترم آزمایشگاه میکروسکوپ الکترونی ( SEM )  
پرسنل زحمتکش آزمایشگاههای متالوگرافی و XRD جناب آقای فیروزی ، سرکار خانم فرهنگیان و سرکار خانم فردین  
و سایر عزیزانی که مرا یاری نمودند.

## چکیده

در این تحقیق واکنش بین پودر هیدراید تیتانیم و آلومینیم مذاب مورد بررسی قرار گرفته است. پدیده‌های تجزیه پودر هیدراید تیتانیم و تشکیل ترکیبات بین فلزی تیتانیم - آلومینیم در این سیستم مشاهده می‌شود. هدف اصلی از انجام این پژوهش، بررسی سینتیک تجزیه پودر هیدراید تیتانیم در تماس با آلومینیم مذاب و استخراج روابط سینتیکی این فرایند و ارائه مکانیزم انجام آن است. برای مطالعه و بررسی این فرایند، واکنش بین هیدراید تیتانیم و آلومینیم مذاب در دماهای ۷۰۰ و ۷۵۰ و ۸۰۰ درجه سانتیگراد انجام گرفته است. در مرحله اول با استخراج نمودار فشار هیدروژن حاصل از تجزیه هیدراید تیتانیم برحسب زمان و به کارگیری روشهای سینتیکی، معادلات سینتیکی این واکنش بدست آمد و در مرحله دوم با استفاده از میکروسکوپهای نوری و الکترونی (SEM) و آزمایش XRD، مطالعات ساختاری بر روی ساختار آلومینیم منجمد شده صورت گرفت. اطلاعات به دست آمده از مرحله اول نشان داد که این واکنش از دیدگاه سینتیکی جزو واکنشهای پیچیده بوده و دارای دو معادله سرعت است به طوریکه در ابتدا واکنش از درجه صفر بوده و تغییرات فشار برحسب زمان به صورت خطی است و در ادامه درجه واکنش از صفر به یک تغییر یافته و تغییرات فشار برحسب زمان به صورت غیر خطی (سه‌می‌گون) است. مطالعات ساختاری انجام شده در مرحله دوم نشان داد که ترکیب واسطه  $TiAl_3$  در اطراف ذرات پودر هیدراید تیتانیم اولیه تشکیل شده و عامل کنترل‌کننده تجزیه هیدراید تیتانیم در طی واکنش است بنابراین تشکیل این ترکیب واسطه توجیه‌کننده تغییر درجه واکنش از صفر به یک می‌باشد. در پایان این پژوهش، برای شناخت بهتر سینتیک تجزیه پودر هیدراید تیتانیم در تماس با آلومینیم مذاب پیشنهاداتی ارائه شده است.

**کلمات کلیدی:** سینتیک، مکانیزم واکنش، پودر هیدراید تیتانیم، آلومینیم مذاب، فوم آلومینیم

## فهرست مطالب

### فصل اول : مقدمه

۱-۱) مقدمه ..... ۱

### فصل دوم : مروری بر منابع

۱-۲) مقدمه ..... ۴

۲-۲) خواص فوم های فلزی ..... ۴

۲-۲-۱) نسبت استحکام به وزن ..... ۴

۲-۲-۲) خواص حرارتی ..... ۴

۲-۲-۳) خواص الکتریکی ..... ۵

۲-۲-۴) جذب صدا در فوم های فلزی ..... ۵

۲-۲-۵) جذب انرژی ..... ۵

۲-۳) کاربرد فومهای فلزی ..... ۷

۲-۳-۱) کاربرد در حمل و نقل ..... ۷

۲-۳-۱-۱) حمل و نقل زمینی و ریلی ..... ۷

۲-۳-۱-۲) حمل و نقل دریایی ..... ۸

۲-۳-۱-۳) حمل و نقل هوایی ..... ۸

۲-۳-۲) کاربرد در صنایع ساختمانی ..... ۸

۲-۳-۲-۱) کاربرد فومهای فلزی به عنوان عایق صوت ..... ۸

۲-۳-۲-۲) کاربرد فومهای فلزی به عنوان آتش گیر ..... ۹

۲-۳-۲-۳) کاربرد تزئینی فومهای فلزی ..... ۹

۲-۳-۳) کاربرد در باتری ها ..... ۹

- ۱۰..... کاربرد در مبدل حرارتی (۴-۳-۲)
- ۱۰..... کاربرد در صنایع نظامی (۵-۳-۲)
- ۱۱..... روشهای تولید فومهای فلزی (۴-۲)
- ۱۱..... روشهای ذوبی (۱-۴-۲)
- ۱۱..... تولید فوم از مذاب به روش تزریق گاز (۱-۱-۴-۲)
- ۱۲..... تولید فوم با استفاده از مواد حباب زا (۲-۱-۴-۲)
- ۱۴..... روش متالورژی پودر (۲-۴-۲)
- ۱۵..... مراحل فیزیکی فرایند تولید فوم (۵-۲)
- ۱۵..... مراحل فرایند تولید فوم (۱-۵-۲)
- ۱۵..... مراحل فیزیکی تولید فوم (۲-۵-۲)
- ۱۷..... بررسی مراحل، پدیده‌ها و پایداری در فومسازی ذوبی (۳-۵-۲)
- ۱۸..... عوامل مؤثر در فرایند تولید فوم فلزی (۶-۲)
- ۲۰..... بررسی ویژگیهای عوامل حباب زا (۱-۶-۲)
- ۲۱..... معرفی اجمالی پودر هیدراید تیتانیم (۱-۱-۶-۲)
- ۲۳..... مقایسه عوامل حباب زای هیدرایدی (۲-۱-۶-۲)
- ۲۷..... مقایسه عوامل حباب زای هیدراید تیتانیم و کربنات کلسیم (۳-۱-۶-۲)
- ۲۸..... تجزیه هیدراید تیتانیم در فومسازی به روش پودری (۴-۱-۶-۲)
- ۳۰..... عوامل مؤثر بر سینتیک تشکیل فوم (۲-۶-۲)
- ۳۰..... تاثیر شرایط فشردن پودرها بر سینتیک تشکیل فوم (۱-۲-۶-۲)
- ۳۲..... تاثیر شرایط حرارتی بر سینتیک فومسازی (۲-۲-۶-۲)
- ۳۴..... بررسی سینتیک تجزیه پودر هیدراید تیتانیم با مذاب آلومینیم در روش پودری (۳-۶-۲)
- ۳۵..... ماهیت تجزیه پودر هیدراید تیتانیم (۴-۶-۲)



## فصل سوم : مواد و روش انجام آزمایش

- ۴۳.....(۱-۳) مقدمه
- ۴۳.....(۲-۳) اهداف
- ۴۳.....(۳-۳) فرضیات
- ۴۴.....(۴-۳) سؤالهای تحقیق
- ۴۴.....(۵-۳) مراحل انجام تحقیق
- ۴۷.....(۶-۳) تجهیزات و مواد مورد استفاده
- ۵۱.....(۷-۳) شرح روش آزمایش
- ۵۳.....(۱-۷-۳) روش محاسبه فشار هوای منبسط شده در داخل لوله فولادی
- ۵۴.....(۲-۷-۳) روش استخراج معادلات سینتیکی
- ۵۴.....(۱-۲-۷-۳) روش انتگرال
- ۵۴.....(۲-۲-۷-۳) روش مشتق
- ۵۵.....(۳-۲-۷-۳) روش انزوا
- ۵۵.....(۴-۲-۷-۳) مقایسه روشهای محاسبه سرعت واکنشها
- ۵۶.....(۸-۳) مطالعات ساختاری
- ۵۶.....(۱-۸-۳) آزمایشهای میکروسکوپ نوری
- ۵۷.....(۲-۸-۳) آزمایشهای میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)
- ۵۷.....(۳-۸-۳) تشخیص فازها توسط XRD

## فصل چهارم : نتایج آزمایشات

- ۵۸.....(۱-۴) نتایج مطالعات سینتیکی
- ۵۸.....(۱-۱-۴) استخراج نمودار فشار هیدروژن - زمان در دمای  $700^{\circ}\text{C}$
- ۵۸.....(۱-۱-۱-۴) محاسبه فشار هوای منبسط شده درون لوله فولادی در دمای  $700^{\circ}\text{C}$
- ۵۹.....(۲-۱-۱-۴) استخراج نمودار فشار کلی (هوا و هیدروژن) بر حسب زمان در دمای  $700^{\circ}\text{C}$

- ۶۰ ..... ۷۰۰°C (۳-۱-۱-۴) استخراج نمودار فشار هیدروژن بر حسب زمان در دمای
- ۶۱ ..... ۷۵۰°C (۲-۱-۴) استخراج نمودار فشار هیدروژن - زمان در دمای
- ۶۱ ..... ۷۵۰°C (۱-۲-۱-۴) محاسبه فشار هوای منبسط شده درون لوله فولادی در دمای
- ۶۲ ... ۷۵۰°C (۲-۲-۱-۴) استخراج نمودار فشار کلی (هوا و هیدروژن) بر حسب زمان در دمای
- ۶۲ ..... ۷۵۰°C (۳-۲-۱-۴) استخراج نمودار فشار هیدروژن بر حسب زمان در دمای
- ۶۳ ..... ۸۰۰°C (۳-۱-۴) استخراج نمودار فشار هیدروژن - زمان در دمای
- ۶۳ ..... ۸۰۰°C (۱-۳-۱-۴) محاسبه فشار هوای منبسط شده درون لوله فولادی در دمای
- ۶۴ ... ۸۰۰°C (۲-۳-۱-۴) استخراج نمودار فشار کلی (هوا و هیدروژن) بر حسب زمان در دمای
- ۶۵ ..... ۸۰۰°C (۳-۳-۱-۴) استخراج نمودار فشار هیدروژن بر حسب زمان در دمای
- ۶۷..... (۲-۴) نتایج مطالعات ساختاری
- ۶۷..... ۷۰۰ °C (۱-۲-۴) نتایج مطالعات ساختاری در دمای
- ۷۰..... ۷۵۰°C (۲-۲-۴) نتایج مطالعات ساختاری در دمای
- ۷۴..... ۸۰۰°C (۳-۲-۴) نتایج بررسی‌های ساختاری در دمای

### فصل پنجم: تحلیل نتایج و بحث

- ۷۷..... (۱-۵) استخراج روابط سینتیکی تجزیه پودر هیدراید تیتانیم در تماس با مذاب آلومینیم
- ۷۸..... ۷۰۰ °C (۱-۱-۵) استخراج روابط سینتیکی در دمای
- ۸۲..... ۷۵۰° C (۲-۱-۵) استخراج روابط سینتیکی در دمای
- ۸۴..... ۸۰۰°C (۳-۱-۵) استخراج روابط سینتیکی در دمای
- ۸۸..... ۸۰۰ °C و ۷۵۰، ۷۰۰ (۴-۱-۵) تحلیل روابط سینتیکی استخراج شده در دماهای
- ۹۰..... (۲-۵) تحلیل مطالعات ساختاری
- ۹۰..... (۱-۲-۵) شناسایی فازهای تشکیل شده
- ۹۳..... ۷۰۰°C (۲-۲-۵) نتایج مطالعات ساختاری در دمای
- ۹۵..... ۷۵۰ °C (۳-۲-۵) نتایج مطالعات ساختاری در دمای

۹۶.....۸۰۰°C در دمای ساختاری مطالعات (۴-۲-۵)

۹۸..... مکانیزم تجزیه پودر هیدراید تیتانیم در تماس با آلومینیم مذاب (۵-۲-۵)

### فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات

۱۰۰..... نتیجه گیری (۱-۶)

۱۰۱..... پیشنهادات (۲-۶)

۱۰۲..... فهرست منابع

## فهرست تصاویر

- شکل (۱-۲): (الف) منحنی نیرو-جابجایی، (ب) منحنی تنش- کرنش برای یک جاذب انرژی
- شکل (۲-۲): فومسازی مستقیم از مذاب به روش تزریق گاز
- شکل (۳-۲): فومسازی مستقیم از مذاب با افزودن ذرات آزاد کننده گاز یا مواد حباب زا (روش تولید فوم آلپوراس)
- شکل (۴-۲): مراحل تولید فوم فلزی به روش متالورژی پودر
- شکل (۵-۲): مراحل فرایند شکل گیری فوم روی در دمای  $600^{\circ}\text{C}$ ، (الف) تشکیل حباب، (ب) رشد حباب و (ج) فروپاشی حباب
- شکل (۶-۲): تصویر شماتیک ساختار و ترتیب تحولات فیزیکی و مراحل فرآیند تولید فوم
- شکل (۷-۲): تغییرات انبساط فوم آلومینیم نسبت به زمان، که در کوره با دمای ثابت  $780^{\circ}\text{C}$  قرار داده شده و سپس تا دمای محیط سرد شده است
- شکل (۸-۲) تصویر شماتیک از مراحل، پدیده‌ها و پایداری فازها در فومسازی ذوبی
- شکل (۹-۲): تصویر میکروسکوپی و شبکه کریستالی پودر هیدراید تیتانیم در دمای اتاق
- شکل (۱۰-۲): تغییر ابعاد سلول واحد و ساختمان کریستالی هیدراید تیتانیم در اثر تغییر دما
- شکل (۱۱-۲): دیاگرام فازی سیستم تیتانیم - هیدروژن
- شکل (۱۲-۲): میزان فشار گاز هیدروژن در اثر تجزیه هیدراید تیتانیم بر حسب دما
- شکل (۱۳-۲): میزان فشار گاز هیدروژن در اثر تجزیه هیدراید تیتانیم موجود در ماده فشرده را بر حسب دما
- شکل (۱۴-۲): تشکیل پوسته گازی دور ذرات حباب  $\text{ZrH}_2$  در مراحل بسیار ابتدایی انبساط فوم روی
- شکل (۱۵-۲): تصاویر SEM از اندازه و شکل ذرات حباب  $\text{ZrH}_2$  (a) هیدراید تیتانیم و (b) کربنات کلسیم
- شکل (۱۶-۲): نتایج تست TGA میزان تجزیه هیدراید تیتانیم و کربنات کلسیم در دماهای مختلف
- شکل (۱۷-۲): سیستم آزمایشگاهی TDS
- شکل (۱۸-۲): نمودار انبساط فومهای Al و  $\text{AlSi}_7$  با  $0.5 \text{ wt}\% \text{ TiH}_2$  بدست آمده از آنالیز TDS
- شکل (۱۹-۲): منحنی‌های انبساط فومهای  $\text{AlSi}_7$  در دماهای مختلف پرس گرم

شکل (۲-۲۰) : منحنی‌های انبساط فومهای AlSi7 در زمانهای پیشگرم ( $t_1$ ) و پرس گرم ( $t_2$ ) مختلف (دمای پرس گرم برای همه نمونه‌ها  $450^{\circ}\text{C}$  می‌باشد)

شکل (۲-۲۱) : منحنی‌های انبساط فوم آلیاژ ۶۰۶۱ در سرعت‌های گرم کردن مختلف

شکل (۲-۲۲) نمودار مراحل مختلف انبساط فوم آلومینیمی (سینتیک فرآیند تجزیه حرارتی هیدراید تیتانیم)

شکل (۲-۲۳): دیاگرام فاز Ti-H

شکل (۲-۲۴): نمودارهای DTA و TGA پودر هیدراید تیتانیم

شکل (۲-۲۵): نمودارهای DTA و تغییرات وزن پودر هیدراید تیتانیم

شکل (۲-۲۶) : نمودار DTA از پودر هیدراید تیتانیم که ۴ ساعت آسیاب شده و با سرعت‌های مختلف (a) 40، (b) 30، (c) 20 و (d) 10 ( $^{\circ}\text{C}/\text{Min}$ ) حرارت داده شده است

شکل (۲-۲۷) : تصویر میکروسکوپ نوری از سطح مقطع دیواره سلول در فوم آلومینیم

شکل (۲-۲۸) : تصویر میکروسکوپ نوری از سطح مقطع فوم آلیاژ آلومینیم (Al-9Si-0.55Mg) با ۱۰ درصد حجمی ذرات پایدارکننده Sic

شکل (۲-۲۹): تصویر الکترون بازگشتی میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع فوم آلیاژ آلومینیم (Al-9Si-0.55Mg) با ۱۰ درصد حجمی ذرات پایدارکننده Sic

شکل (۲-۳۰): تصویر SEM از سطح مقطع دیواره سلول در فوم آلپوراس، (a) بزرگنمایی  $900\times$ ، (b) بزرگنمایی  $500\times$

شکل (۲-۳۱) : تصویر شماتیک سیستم TPD

شکل (۲-۳۲): درصد تجزیه پودر هیدراید تیتانیم بر حسب زمان

شکل (۳-۱): (الف) نمای شماتیک سیستم آزمایشگاهی طراحی شده برای انجام تحقیق حاضر

شکل (۳-۱): (ب) نمای شماتیک از چیدمان داخل کوره

شکل (۳-۲) : مراحل انجام تحقیق و آزمایشات

شکل (۳-۳) : سنسور فشار

شکل (۳-۴) : تصویر پودر هیدراید تیتانیم

شکل (۳-۵) : الگوی XRD از پودر هیدراید تیتانیم اولیه

شکل (۳-۶) : توریع اندازه متوسط ذرات پودر هیدراید تیتانیم

شکل (۳-۷) : تصویر SEM از ذرات پودر هیدراید تیتانیم

شکل (۳-۸) : دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مجهز به سیستم آنالیز EDAX

شکل (۳-۹) : نمای شماتیک از جهت برش نمونه‌ها و مقطع مورد بررسی

شکل (۴-۱) : نمودار تغییرات فشار هوا بر حسب زمان در دمای  $700^{\circ}\text{C}$

شکل (۴-۲) : نمودار تغییرات فشار هوا و هیدروژن بر حسب زمان در دمای  $700^{\circ}\text{C}$

شکل (۴-۳) : ترکیب دو نمودار (۴-۱) و (۴-۲) در دمای  $700^{\circ}\text{C}$

شکل (۴-۴) : نمودار تغییرات فشار گاز هیدروژن بر حسب زمان در دمای  $700^{\circ}\text{C}$

شکل (۴-۵) : نمودار تغییرات فشار هوا بر حسب زمان در دمای  $750^{\circ}\text{C}$

شکل (۴-۶) : نمودار تغییرات فشار هوا و هیدروژن بر حسب زمان در دمای  $750^{\circ}\text{C}$

شکل (۴-۷) : ترکیب دو نمودار (۴-۵) و (۴-۶) در دمای  $750^{\circ}\text{C}$

شکل (۴-۸) : نمودار تغییرات فشار گاز هیدروژن بر حسب زمان در دمای  $750^{\circ}\text{C}$

شکل (۴-۹) : نمودار تغییرات فشار هوا بر حسب زمان در دمای  $800^{\circ}\text{C}$

شکل (۴-۱۰) : نمودار تغییرات فشار هوا و هیدروژن بر حسب زمان در دمای  $800^{\circ}\text{C}$

شکل (۴-۱۱) : ترکیب دو نمودار (۴-۹) و (۴-۱۰) در دمای  $800^{\circ}\text{C}$

شکل (۴-۱۲) : نمودار تغییرات فشار گاز هیدروژن بر حسب زمان در دمای  $800^{\circ}\text{C}$

شکل (۴-۱۳) : نمودار مقایسه تغییرات فشار گاز هیدروژن بر حسب زمان در دماهای

$700^{\circ}\text{C}$  ،  $750^{\circ}\text{C}$  و  $800^{\circ}\text{C}$

شکل (۴-۱۴) : تصویر SEM از آلومینیم منجمد شده در دمای  $700^{\circ}\text{C}$

شکل (۴-۱۵) : تصویر شماتیک از فازهای تشکیل شده در ساختار آلومینیم منجمد شده

شکل (۴-۱۶) : تصویر SEM از آلومینیم منجمد شده در دمای  $700^{\circ}\text{C}$

شکل (۴-۱۷) : آنالیز EDAX از فاز سفید رنگ (نقطه A) در تصویر SEM در دمای  $700^{\circ}\text{C}$

شکل (۴-۱۸) : آنالیز EDAX از فاز خاکستری روشن (نقطه B) در تصویر SEM در دمای  $700^{\circ}\text{C}$

شکل (۴-۱۹) : آنالیز EDAX از فاز خاکستری تیره (نقطه C) در تصویر SEM در دمای  $700^{\circ}\text{C}$

شکل (۴-۲۰) : آنالیز XRD از آلومینیم منجمد شده در دمای  $700^{\circ}\text{C}$

- شکل (۴-۲۱) : تصویر SEM از آلومینیم منجمد شده در دمای  $750^{\circ}\text{C}$
- شکل (۴-۲۲) : تصویر SEM از آلومینیم منجمد شده در دمای  $750^{\circ}\text{C}$
- شکل (۴-۲۳) : آنالیز EDAX از فاز سفید رنگ ( نقطه A ) در تصویر SEM در دمای  $750^{\circ}\text{C}$
- شکل (۴-۲۴) : آنالیز EDAX از فاز خاکستری روشن ( نقطه B ) در تصویر SEM در دمای  $750^{\circ}\text{C}$
- شکل (۴-۲۵) : آنالیز EDAX از فاز خاکستری تیره ( نقطه C ) در تصویر SEM در دمای  $750^{\circ}\text{C}$
- شکل (۴-۲۶) : آنالیز XRD از آلومینیم منجمد شده در دمای  $750^{\circ}\text{C}$
- شکل (۴-۲۷) : تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از آلومینیم منجمد شده در دمای  $800^{\circ}\text{C}$
- شکل (۴-۲۸) : تصویر SEM از آلومینیم منجمد شده در دمای  $800^{\circ}\text{C}$
- شکل (۴-۲۹) : آنالیز EDAX از فاز سفید روشن ( نقطه A ) در تصویر SEM در دمای  $800^{\circ}\text{C}$
- شکل (۴-۳۰) : آنالیز EDAX از فاز خاکستری روشن ( نقطه B ) در تصویر SEM در دمای  $800^{\circ}\text{C}$
- شکل (۴-۳۱) : آنالیز EDAX از فاز خاکستری تیره ( نقطه C ) در تصویر SEM در دمای  $800^{\circ}\text{C}$
- شکل (۴-۳۲) : آنالیز XRD از آلومینیم منجمد شده در دمای  $800^{\circ}\text{C}$
- شکل (۵-۱) : نمودار تغییرات فشار گاز هیدروژن بر حسب زمان در دمای  $700^{\circ}\text{C}$
- شکل (۵-۲) : قسمت خطی از نمودار فشار-زمان و خط برازش شده آن در دمای  $700^{\circ}\text{C}$
- شکل (۵-۳) : قسمت سهمی گون از نمودار فشار هیدروژن-زمان
- شکل (۵-۴) : نمودار  $dp/dt$  بر حسب P و خط برازش شده آن در دمای  $700^{\circ}\text{C}$
- شکل (۵-۵) : نمودار تغییرات فشار گاز هیدروژن بر حسب زمان در دمای  $750^{\circ}\text{C}$
- شکل (۵-۶) : قسمت خطی از نمودار فشار-زمان و خط برازش شده آن در دمای  $750^{\circ}\text{C}$
- شکل (۵-۷) : قسمت سهمی گون از نمودار فشار هیدروژن-زمان
- شکل (۵-۸) : نمودار  $dp/dt$  بر حسب P و خط برازش شده آن در دمای  $750^{\circ}\text{C}$
- شکل (۵-۹) : نمودار تغییرات فشار گاز هیدروژن بر حسب زمان در دمای  $800^{\circ}\text{C}$
- شکل (۵-۱۰) : قسمت خطی از نمودار فشار-زمان و خط برازش شده آن در دمای  $800^{\circ}\text{C}$
- شکل (۵-۱۱) : قسمت سهمی گون از نمودار فشار هیدروژن-زمان
- شکل (۵-۱۲) : نمودار  $dp/dt$  بر حسب P و خط برازش شده آن در دمای  $800^{\circ}\text{C}$
- شکل (۵-۱۳) : نمودار فشار-زمان در منطقه خطی در دماهای  $700^{\circ}\text{C}$ ،  $750^{\circ}\text{C}$  و  $800^{\circ}\text{C}$

شکل (۵-۱۴) : (الف) دیاگرام فاز Ti-Al ، (ب) فازهای موجود در دیاگرام فاز Ti-Al

شکل (۵-۱۵) : تصویر SEM از حفرات میله‌ای در بزرگنمایی‌های مختلف در دمای  $700^{\circ}\text{C}$

شکل (۵-۱۶) : تصویر SEM از حفرات میله‌ای در دمای  $700^{\circ}\text{C}$  و آنالیز EDAX از ذرات کلوخه‌ای

شکل (۵-۱۷) : تصویر SEM از حفرات مجتمع در بزرگنمایی‌های مختلف در دمای  $750^{\circ}\text{C}$

شکل (۵-۱۸) : تصویر SEM از حفرات مجتمع در دمای  $750^{\circ}\text{C}$  و آنالیز EDAX از ذرات کلوخه‌ای

شکل (۵-۱۹) : تصویر SEM از حفرات مجتمع در بزرگنمایی‌های مختلف در دمای  $800^{\circ}\text{C}$

شکل (۵-۲۰) : تصویر SEM از حفرات مجتمع در دمای  $800^{\circ}\text{C}$  و آنالیز EDAX از ذرات کلوخه‌ای

شکل (۵-۲۱) : تصویر شماتیک مکانیزم تجزیه حرارتی پودر هیدراید تیتانیم در تماس با آلومینیم

مذاب



## فهرست جداول

- جدول (۱-۲): خواص فیزیکی و شیمیایی برخی از هیدرایدهای فلزی
- جدول (۲-۲): روابط سینتیکی تجزیه پودر هیدراید تیتانیم در دماهای مختلف
- جدول (۱-۳): ترکیب شیمیایی آلومینیم مورد استفاده
- جدول (۲-۳): مشخصات پودر هیدراید تیتانیم مورد استفاده
- جدول (۱-۵): مقادیر ثابت سرعت واکنش تجزیه هیدراید تیتانیم در تماس با مذاب در دماهای ۷۰۰، ۷۵۰ و ۸۰۰ °C
- جدول (۲-۵): مقایسه نمودارهای فشار-زمان در دماهای ۷۰۰، ۷۵۰ و ۸۰۰ °C



## 1-1) مقدمه

فومهای فلزی خانواده‌ای از مواد نو هستند که به نظر می‌رسد به دلیل ویژگی‌های منحصر به فردشان، فرصتهای فراوانی برای توسعه در سال‌های آتی دارند.

رایج‌ترین فومهای فلزی را فومهای آلومینیمی تشکیل می‌دهند، هر چند که گسترش تدریجی کاربرد فومهای فلزی به سایر فلزات نظیر فولاد، آلیاژهای مس، نیکل، سرب و روی، منیزیم، تیتانیوم نیز قابل پیش‌بینی است.

فومهای فلزی خواص متنوع و گوناگونی از خود به نمایش گذاشته که بارزترین این خصوصیات سبکی و نسبت استحکام به وزن بالا در این مواد است. این ویژگی جایگاه خاصی در طراحی مهندسی سازه‌ها و قطعات در کاربردهای گوناگون دارد [۱].

صنایع حمل و نقل مشتمل بر ریلی، دریایی و صنعت خودرو از جدی‌ترین بخشهای صنعتی است که توسعه کاربرد فومهای فلزی در آنها جذابیت‌های متنوعی را دارد. در این بخش از صنایع، خواص صوتی نیز نظیر خواص مکانیکی این مواد دارای اهمیت است [۲].

فومها به روشهای مختلفی در مقیاس آزمایشگاهی و صنعتی تولید شده‌اند. روش تزریق گاز در مذاب، استفاده از مواد حباب‌زا و روشهای مبتنی بر متالورژی پودر از مهمترین این روشهاست. در روش بهره‌گیری از مواد حباب‌زا پس از تهیه و آماده‌سازی مذاب، مواد آزادکننده گاز طی فرایندهای مختلفی به مذاب افزوده شده و طی تماس این مواد با مذاب واکنشهایی به وقوع پیوسته که منجر به آزاد شدن گاز می‌گردد. گاز ایجادشده به تدریج در بطن مذاب رشد نموده و بر اثر انبساط حاصله، مایع فومی شکلی تشکیل می‌شود. با سریع سرد شدن و انجماد مایع حاوی گاز، نهایتاً فوم فلزی جامد شکل می‌گیرد.

متداول‌ترین عامل حباب‌زا، پودر هیدراید تیتانیوم<sup>۱</sup> است هرچند که گزارشهایی از کاربرد سایر مواد حباب‌زا نظیر کربنات کلسیم نیز در دست است.

مرحله تولید گاز، مهم‌ترین مرحله در تولید فومهای فلزی است زیرا در این مرحله در اثر تجزیه پودر هیدراید تیتانیوم در تماس با مذاب مقدار زیادی گاز هیدروژن در زمان بسیار کوتاهی تولید می‌شود.

---

1. TiH<sub>2</sub>

شناخت سینتیک واکنش تجزیه پودر هیدراید تیتانیوم در تماس با مذاب باعث افزایش توانمندی در کنترل و بهینه‌سازی فرایند و ساختار فومها می‌شود. استخراج اطلاعات سینتیکی نظیر سرعت و مکانیزم واکنش تجزیه حرارتی پودر می‌تواند نقش تعیین کننده‌ای در محصولات آتی در زمینه تولید فومهایی با کیفیت مطلوب داشته باشد.

هر چند تحقیقاتی در زمینه بررسی سینتیک تجزیه پودر هیدراید تیتانیوم در عملیات فومسازی گزارش شده است اما اکثر قریب به اتفاق آنها معطوف به چگونگی آزادسازی گاز از مواد حباب‌زا در فرایند فومسازی مبتنی بر روشهای متالورژی پودر است و بیشتر آنها سینتیک تجزیه پودر هیدراید تیتانیوم را بصورت غیر مستقیم بررسی نموده‌اند و سرعت تجزیه پودر هیدراید تیتانیوم را از سنجش میزان انبساط فوم با روشهای مختلف نظیر استفاده از X-Ray Radioscopy ، Expandometer ویا HTXRD<sup>1</sup> محاسبه نموده‌اند. اما تحقیقات بسیار محدودی در زمینه واکنشهای مزبور در روش ذوبی گزارش گردیده است. بنابراین می‌توان علت را در ساده‌تر بودن بررسی سینتیک تجزیه پودر هیدراید تیتانیوم در روش پودری و سهولت کنترل شرایط مختلف در حین آزمایش یافت در حالی که در روش ذوبی به علت حضور مذاب کنترل شرایط بسیار دشوار است لذا اکثر محققین از تحقیق بر روی این روش پرهیز نموده‌اند. از طرف دیگر نتایج تحقیق بر روی روش پودری را نمی‌توان در مورد روش ذوبی بکاربرد در نتیجه بررسی سینتیک تجزیه پودر هیدراید تیتانیوم در تماس با مذاب در روش ذوبی از ضرورت بسیار بالایی برخوردار است که در پژوهش حاضر به آن پرداخته شده است.

بخشی از تحقیقات گزارش شده نیز مرتبط با ویژگیهای عوامل حباب‌زا از جمله پودر هیدراید تیتانیوم و خارج از محیط فومسازی بوده است.

در تحقیق حاضر برای بررسی سینتیک تجزیه پودر هیدراید تیتانیوم در تماس با مذاب در تولید فوم فلزی به روش ذوبی، سیستم آزمایشگاهی ویژه‌ای طراحی گردید. در این سیستم پودر فشرده هیدراید تیتانیوم در داخل یک لوله فولادی در تماس با مذاب قرار گرفته و در اثر تجزیه حرارتی و واکنش با مذاب، گاز هیدروژن آزاد می‌شود. فشار گاز هیدروژن تولیدی به وسیله یک سنسور فشار اندازه‌گیری و

---

1 . High Temperature X-Ray Diffraction