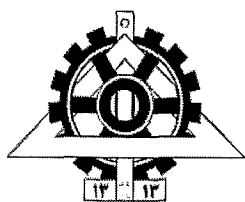


به نام خدا بایاد خدا و برای خدا



دانشگاه تهران  
پردیس دانشکده های فنی  
دانشکده مهندسی متالورژی و مواد

**بررسی تاثیر ترکیبات بین فلزی غنی از آهن بر رفتار تریبولوژیکی  
آلیاژهای Al-Si**

نگارش:

رضا تقی آبادی

استاد راهنما:

دکتر حمید رضا قاسمی منفرد راد

استاد مشاور:

دکتر سعید شبستری

معاونت امور علمی و پژوهشی  
موسسه تحقیقات و فناوری

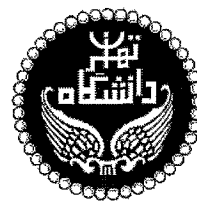
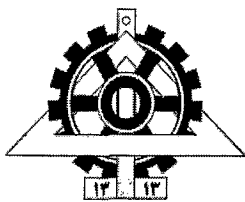
۱۳۸۶ / ۳ / ۱۱

پایان نامه برای دریافت درجه دکترای تخصصی در رشته مهندسی مواد

اسفند ۱۳۸۶

۹۳ ۸۷ ۶

عسی



## تعهد نامه اصالت اثر

اینجانب رضا تقی آبادی تایید می‌کنم که مطالب مندرج در این رساله حاصل کار پژوهشی اینجانب است و به دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این نوشته از آنها استفاده شده است مطابق مقررات ارجاع گردیده است. این رساله قبلاً برای احراز هیچ مدرک هم سطح یا بالاتر ارائه نشده است. کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به دانشکده فنی دانشگاه تهران می‌باشد.

نام و نام خانوادگی دانشجو: رضا تقی آبادی

امضاء دانشجو:

## تقدیم به پدر و مادر بزرگوارم

آنان که سالها تلاش و زحمت را برای به بار نشستن درخت زندگیم به جان خریدند و رنج و زحمت بسیاری را به امید پرورش گلهای سعادت و خوشبختی تحمل کردند. آنان که عمر کرانه شان با عشق حقیقی به فرزندان می‌گذرد و منظر ایمان، صبر و شکیبایی هستند و آنان که در تمامی لحظات عمر نخواهم توانست آنچه حق تمامی زحمات آنهاست را به جای آورم

و

تقدیم به آنان که به نام یک خانواده به ایشان همبسته ام و مهر و محبت شان دستگیر و یاور واقعی من است.

## چکیده

در این پژوهش تاثیر ترکیبات بین فلزی غنی از آهن بر رفتار تریبولوژیکی آلیاژهای هیپوئوتکتیک Al-Si مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور آلیاژ F۳۳۲ حاوی ۰/۱۵ درصد آهن به عنوان آلیاژ پایه انتخاب گردیده و مقادیر مختلف آهن شامل ۰/۷، ۱/۲، ۱/۸ و ۲/۵ درصد به مذاب این آلیاژ افزوده گردید. به منظور بررسی تاثیر سرعت انجماد و بهسازی شیمیایی بر ترکیبات غنی از آهن و خواص تریبولوژیکی، آلیاژهای فوق با استفاده از منگنز و استرانسیم تحت عملیات بهسازی قرار گرفته و سپس در قالب چدنی پیشگرم شده با سرعت انجماد متوسط ۳°C/s و قالب مسی آبگرد با سرعت انجماد متوسط حدود ۱۵°C/s ریخته‌گری گردیدند. در ادامه کلیه نمونه‌های تهیه شده تحت بررسیهای ریزساختاری، آنالیز تصویری و آنالیز فازی قرار گرفتند.

رفتار سایشی آلیاژها به روش پین روی دیسک در شرایط خشک و سه دمای ۲۵، ۱۰۰ و ۲۰۰ °C تحت چهار نیروی ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۸۰N، سرعت لغزش ۰/۵m/s و مسافت ۱۰۰۰m مورد بررسی قرار گرفت. همچنین به منظور تفسیر بهتر نتایج حاصل از بررسی رفتار تریبولوژیکی، تاثیر آهن بر خواص مکانیکی آلیاژ شامل استحکام کششی، استحکام تسلیم، درصد ازدیاد طول، سختی و مقاومت به ضربه نیز بررسی گردید. نتایج حاصله حاکی از آن است که در سرعت انجماد ۳°C/s افزودن آهن تا حدود ۰/۷ درصد به آلیاژ پایه موجب بهبود سختی و مقاومت به سایش آن گردیده و تاثیر منفی بر استحکام کششی و انعطاف پذیری آن ندارد. بر اساس نتایج حاصل از بررسیهای ریزساختاری، آنالیز فازی و آنالیز تصویری، افزودن آهن موجب شکل‌گیری رسوبات بتای صفحه‌ای شکل با فرمول شیمیایی  $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$  در زمینه می‌گردد که کسر حجمی و طول متوسط آنها به سرعت انجماد و غلظت آهن وابسته بوده و در صورت افزایش میزان آهن و/با کاهش سرعت انجماد افزایش می‌یابد. چنانچه غلظت آهن در آلیاژ حدود ۰/۷ درصد باشد کسر حجمی رسوبات بتا کم بوده و این ذرات به صورت ریز و بین دندریتی در زمینه رسوب می‌نمایند. با این حال افزودن مقادیر بیشتر آهن موجب افزایش کسر حجمی و طول متوسط رسوبات سخت و شکننده بتا می‌گردد. تحت این شرایط سختی آلیاژ افزایش یافته ولی مقاومت به ضربه، انعطاف پذیری و مقاومت سایشی آن کاهش می‌یابد.

افزودن منگنز موجب جایگزین شدن رسوبات صفحه ای شکل بتا توسط رسوباتی با مورفولوژی مناسب تر موسوم به فاز آلفا ( $\alpha\text{-Al}_{15}(\text{Fe},\text{Mn})_3\text{Si}_2$ ) گردیده و موجب کاهش قابل ملاحظه اثرات تردی

ناشی از حضور رسوبات بتا در زمینه آلیاژ می گردد. بنابراین ضمن حفظ سختی آلیاژ در حضور ذرات آلفا، انعطاف پذیری آن نیز افزایش یافته و این می تواند مقاومت به سایش آلیاژ بهسازی شده را در مقایسه با شرایط عدم بهسازی به میزان قابل توجهی بهبود دهد. به عنوان مثال در سایش تحت نیروی  $40\text{N}$  مقاومت به سایش آلیاژ حاوی  $1/8$  درصد آهن بهسازی شده توسط منگنز، که بهترین خواص سایشی را در بین آلیاژهای بهسازی شده ارائه می نماید حدود  $25$  درصد بیشتر از مقاومت به سایش آلیاژ حاوی  $0/7$  درصد آهن است که بهترین خواص سایشی را در شرایط بهسازی نشده ارائه می نمود.

تاثیر افزایش سرعت انجماد و بهسازی شیمیایی در بهبود خواص مکانیکی و تریبولوژیکی آلیاژ  $F332$  به مراتب بیشتر است. افزایش سرعت انجماد فاصله بین بازوهای ثانویه دندریتی را کاهش داده و ضمن کاهش ابعاد فازهای ثانوی و تخلخلها، توزیع آنها در زمینه را یکنواخت تر می گرداند و موجب افزایش استحکام، سختی و درصد ازدیاد طول آلیاژ می گردد. بر این اساس مقاومت به سایش آلیاژهای منجمد شده تحت سرعت  $15^\circ\text{C/s}$  پس از بهسازی بیشتر از مقاومت به سایش آلیاژهای تهیه شده در قالب چدنی است. نتایج حاصله نشان می دهد که در مورد آلیاژ حاوی  $1/2$  درصد آهن، سختی، استحکام کششی و درصد ازدیاد طول پس از بهسازی توسط استرانسیم و انجماد سریع به ترتیب حدود  $25$ ،  $70$  و  $400$  درصد بهبود یافته و مقاومت به سایش آلیاژ در محدوده بارهای مورد مطالعه بین  $50$  تا  $70$  درصد افزایش می یابد.

نتایج حاصل از بررسی تاثیر ترکیبات غنی از آهن بر رفتار تریبولوژیکی دما بالای آلیاژ  $F332$  نیز حاکی از آن است که حضور این ترکیبات سخت و نقطه ذوب بالا، موجب بهبود مقاومت سایشی آلیاژ در دماهای بالا می گردد. به عنوان مثال مقاومت به سایش آلیاژ حاوی  $1/8$  درصد آهن پس از بهسازی توسط منگنز در دو دمای  $100^\circ\text{C}$  و  $200^\circ\text{C}$  و نیروی  $40\text{N}$  به ترتیب حدود  $15$  و  $20$  درصد بیشتر از مقاومت به سایش آلیاژ بهسازی نشده حاوی  $0/7$  درصد آهن در شرایط کاری یکسان است. با توجه به نتایج به دست آمده از تعیین خواص کششی در دمای بالا، بهبود خواص سایشی در دماهای بالا را می توان ناشی از افزایش انعطاف پذیری آلیاژ و نقش موثر ترکیبات غنی از آهن نقطه ذوب بالا در افزایش پایداری حرارتی آلیاژ دانست.

**واژه های کلیدی:** آلومینیم-سیلیسیم، انجماد، ترکیب بین فلزی، بهسازی، تریبولوژی، سایش، اصطکاک

## تقدیر و شکر

حمد و سپاس فراوان به درگاه ایزد متعال که کلمات عشق در ذات عالم جاریست. او که می‌داند از شکر نعمتهای بی‌شمارش عاجزیم و جز لطف و مهرش در دنیا و آخرت هیچ امیدی ندارم...

در ابتدای این رساله سپاس و شکر خود را خدمت استاد کرامیم جناب آقای دکتر حمیدرضا قاسمی تقدیم می‌دارم که صبر، تحمل، حیات و هدایت ایشان موثرترین نقش را در به ثمر رسیدن این تحقیق داشت. از استاد که تقدیر جناب آقای دکتر سعید شهبستی که مسئولیت مشاوره این پروژه را بر عهده داشتند و تجربیات ارزشمند خویش را صمیمانه در اختیار بنده قرار دادند، شکر و قدر دانی می‌نمایم. از اساتید کرامی جناب آقای دکتر عطائی معاون محترم تحصیلات تکمیلی دانشکده مهندسی متالورژی و مواد و جناب آقایان دکتر اخلاقی، دکتر سعدی، دکتر ثقفیان و دکتر سسی که زحمت بازخوانی و داوری این رساله را متقبل شدند کمال شکر را دارم. همچنین لازم می‌دانم که از زحمات و راهنماییهای ارزشمند و بی‌دریغ استاد محترم جناب آقای دکتر رضا محمودی ساکن‌زاری نمایم.

از برادران عزیزم جناب آقایان مهندس احمد و امین سعدی که با حمایت‌های خویش شرایط را برای انجام هر چه بهترین رساله فراسم نمودند صمیمانه شکر و قدر دانی می‌نمایم.

از دوست عزیزم جناب آقای مهندس وحید ابوبی که اینجانب را در انجام بخشی از آزمایشهای پروژه همراهی نمودند نهایت شکر و قدر دانی را دارم. همچنین لازم می‌دانم که از دوستان عزیزم جناب آقایان مهندس اکبر اسحاقی، محمد امامی و محمد مدنی صمیمانه سپاسگزاری نمایم.

## فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه.....	۱
فصل دوم: مروری بر منابع مطالعاتی.....	۳
۲-۱- معرفی آلیاژ F۳۳۲ آلومینیم.....	۳
۲-۲- تریبولوژی و سایش آلیاژهای Al-Si.....	۶
۲-۲-۱- بررسی رژیم های سایش لغزشی در آلیاژهای Al-Si.....	۷
۲-۲-۱-۱- سایش بسیار خفیف.....	۷
۲-۲-۱-۲- سایش خفیف.....	۷
۲-۲-۱-۳- سایش شدید.....	۱۰
۲-۲-۱-۴- سایش ذوبی.....	۱۴
۲-۲-۱-۵- قفل شدن.....	۱۴
۲-۲-۲- بررسی ویژگیهای سطحی و خرده های سایشی در دو رژیم سایش خفیف و شدید.....	۱۵
۲-۲-۲-۱- سطح سایش.....	۱۵
۲-۲-۲-۲- ذرات ناشی از سایش.....	۱۵
۲-۲-۲-۳- لایه های زیرسطحی.....	۱۷
۲-۲-۳- اصطکاک.....	۱۷
۲-۲-۴- بررسی تاثیر پارامترهای موثر بر نرخ سایش آلیاژهای Al-Si.....	۲۰
۲-۲-۴-۱- تاثیر بار بر نرخ سایش.....	۲۱
۲-۲-۴-۲- تاثیر مسافت لغزش بر نرخ سایش.....	۲۱
۲-۲-۴-۳- تاثیر سرعت لغزش بر نرخ سایش.....	۲۴
۲-۲-۴-۴- تاثیر دما بر نرخ سایش.....	۲۶



- ۲۹.....۲-۲-۴-۵-تائیر میزان و مورفولوژی سیلیسیم آلیاژ بر نرخ سایش
- ۲۹.....۲-۲-۴-۶-تائیر عملیات حرارتی بر نرخ سایش
- ۳۱.....۲-۲-۴-۷-تائیر عناصر آلیاژی بر نرخ سایش آلیاژهای Al-Si
- ۳۲.....۲-۲-۴-۳-ترکیبات بین فلزی حاوی آهن در سیستم سه تایی Al-Fe-Si
- ۳۲.....۲-۳-۱-تائیر افزودن آهن به آلیاژهای هیپویوتکتیک Al-Si
- ۳۶.....۲-۴-۲-تائیر ترکیبات بین فلزی حاوی آهن بر خواص مکانیکی آلیاژهای هیپویوتکتیک Al-Si
- ۳۶.....۲-۴-۲-۱-خواص مکانیکی در دمای محیط
- ۳۹.....۲-۴-۲-۲-خواص مکانیکی دمای بالا
- ۳۹.....۲-۴-۳-روشهای خنثی سازی اثرات مخرب آهن در آلیاژهای Al-Si
- ۳۹.....۲-۴-۳-۱-بهبودی شیمیایی
- ۴۰.....۲-۴-۳-۱-۱-بهبودی توسط منگنز
- ۴۲.....۲-۴-۳-۱-۲-بهبودی توسط استرانسیم
- ۴۳.....۲-۴-۳-۲-تائیر سرعت سرد کردن (انجماد)
- ۴۳.....۲-۴-۳-۳-تائیر دمای فوق گداز
- ۴۴.....۲-۴-۳-۴-تائیر عملیات حرارتی
- ۴۶.....۲-۴-۴-جدایش وزنی ترکیبات بین فلزی و اثرات نامطلوب ناشی از آن
- ۴۹.....**فصل سوم: مواد و روش پژوهش**
- ۴۹.....۳-۱-تهیه و آماده سازی مواد اولیه
- ۴۹.....۳-۲-عملیات ذوب و ریخته گری
- ۴۹.....۳-۲-۱-بررسی تائیر افزودن آهن و منگنز بر ریزساختار و خواص آلیاژ
- ۵۱.....۳-۲-۲-بررسی تائیر سرعت انجماد و افزودن عناصر بهساز بر ریزساختار و خواص آلیاژ F۳۳۲
- ۵۲.....۳-۳- بررسی ساختار میکروسکوپی و آنالیز تصویری

۵۲	۳-۳-۱- بررسی ساختار میکروسکوپی
۵۳	۳-۳-۲- آنالیز تصویری
۵۳	۳-۴- بررسی خواص مکانیکی
۵۵	۳-۴-۱- آزمون کششی
۵۵	۳-۴-۲- سختی سنجی
۵۵	۳-۴-۳- آزمون مقاومت به ضربه (چقرمگی ضربه ای)
۵۶	۳-۵- تعیین درصد تخلخل
۵۶	۳-۶- آزمایش سایش
۵۹	۳-۶-۱- تهیه پین های سایش
۵۹	۳-۶-۲- تهیه دیسکهای سایش
۵۹	۳-۶-۳- طراحی آزمایش سایش
۶۰	۳-۶-۴- بررسی های میکروسکوپی (نوری و الکترونی)
۶۰	۳-۶-۴-۱- بررسی سطح سایش
۶۱	۳-۶-۴-۲- بررسی نواحی زیر سطحی
۶۱	۳-۶-۴-۳- بررسی براده های سایشی
۶۲	<b>فصل چهارم: نتایج</b>
۶۲	۴-۱- نتایج آلیاژسازی و بررسی کمی و کیفی ساختار متالورژیکی آلیاژها
۶۲	۴-۱-۱- بررسی ترکیب شیمیایی
۶۲	۴-۱-۲- بررسی ریزساختار آلیاژهای ریخته گری شده در قالب چدنی
۷۰	۴-۱-۲- بررسی ریزساختار آلیاژهای ریخته گری شده در قالب مسی آبگرد
۷۸	۴-۲- بررسی چگالی و درصد تخلخل نمونه ها
۷۸	۴-۳- نتایج بررسی خواص مکانیکی

- ۷۸.....۴-۳-۱- خواص کششی
- ۸۵.....۴-۳-۱-۱- بررسی سطوح شکست
- ۸۸.....۴-۳-۲- نتایج سختی سنجی
- ۹۲.....۴-۳-۳- نتایج آزمون ضربه
- ۹۵.....۴-۴- نتایج بررسی رفتار تریبولوژیکی
- ۹۵.....۴-۴-۱- بررسی رفتار سایشی آلیاژهای ریخته‌گری شده در قالب چدنی (سرعت انجماد  $3^{\circ}\text{C/s}$ )
- ۹۵.....۴-۴-۱-۱- نتایج آزمایش سایش در دمای محیط
- ۹۷.....۴-۴-۱-۱-۱- بررسی سطوح سایش
- ۱۰۸.....۴-۴-۱-۱-۲- بررسی نواحی زیر سطحی
- ۱۱۳.....۴-۴-۱-۲- نتایج آزمایش سایش در دمای بالا
- ۱۱۳.....۴-۴-۱-۲-۱- بررسی نرخ سایش
- ۱۱۹.....۴-۴-۱-۲-۲- بررسی سطوح سایش
- ۱۲۹.....۴-۴-۱-۲-۳- بررسی نواحی زیر سطحی
- ۱۳۴.....۴-۴-۲- بررسی رفتار سایشی آلیاژهای ریخته‌گری شده در قالب مسی آبگرد (سرعت انجماد  $15^{\circ}\text{C/s}$ )
- ۱۳۴.....۴-۴-۲-۱- نتایج آزمایش سایش در دمای محیط
- ۱۳۴.....۴-۴-۲-۱-۱- بررسی نرخ سایش
- ۱۳۶.....۴-۴-۲-۱-۲- بررسی سطوح سایش
- ۱۳۶.....۴-۴-۲-۱-۳- بررسی نواحی زیر سطحی
- ۱۴۰.....۴-۴-۲-۲- نتایج آزمایش سایش در دمای بالا
- ۱۴۰.....۴-۴-۲-۲-۱- بررسی نرخ سایش
- ۱۴۲.....۴-۴-۲-۲-۲- بررسی سطوح سایش
- ۱۴۲.....۴-۴-۳- نتایج اصطکاک
- ۱۴۷.....۴-۴-۴- نتایج بررسی سایش دیسک فولادی

فصل پنجم: بحث.....	۱۵۱
۵-۱- بررسی ساختار میکروسکپی.....	۱۵۱
۵-۱-۱- ساختار میکروسکپی نمونه های تهیه شده در قالب چدنی پیشگرم شده (سرعت انجماد $3^{\circ}C/s$ ).....	۱۵۱
۵-۱-۲- ساختار میکروسکپی نمونه های تهیه شده در قالب مسی آبگرد (سرعت انجماد $15^{\circ}C/s$ ).....	۱۶۱
۵-۲- تجزیه و تحلیل تاثیر متقابل ساختار میکروسکپی و خواص مکانیکی.....	۱۶۵
۵-۲-۱- بررسی و تجزیه و تحلیل خواص مکانیکی در دمای محیط.....	۱۶۵
۵-۲-۲- بررسی خواص مکانیکی در دمای بالا.....	۱۸۴
۵-۳- تاثیر ترکیبات بین فلزی غنی از آهن بر رفتار تریبولوژیکی آلیاژ F۳۳۲ در دمای محیط.....	۱۸۶
۵-۳-۱- بررسی ارتباط بین خواص مکانیکی و مقاومت سایشی.....	۱۸۶
۵-۳-۲- تجزیه و تحلیل تاثیر متقابل ریزساختار، خواص مکانیکی و رفتار تریبولوژیکی آلیاژ F۳۳۲.....	۱۹۵
۵-۳-۲-۱- بررسی تاثیر ترکیبات بین فلزی غنی از آهن بر سایش آلیاژ F۳۳۲ (سرعت انجماد $3^{\circ}C/s$ ).....	۱۹۵
۵-۳-۲-۲- بررسی تاثیر بهسازی ترکیبات بین فلزی غنی از آهن توسط منگنز بر سایش آلیاژ F۳۳۲	
(سرعت انجماد $3^{\circ}C/s$ ).....	۲۱۸
۵-۳-۲-۳- بررسی تاثیر ترکیبات بین فلزی غنی از آهن بر رفتار سایشی دما بالای آلیاژ F۳۳۲ (سرعت انجماد $3^{\circ}C/s$ ).....	۲۲۸
۵-۳-۲-۴- بررسی تاثیر بهسازی شیمیایی توسط استرانسیم و/یا منگنز و افزایش سرعت انجماد	
( $15^{\circ}C/s$ ) بر رفتار سایشی آلیاژ F۳۳۲ حاوی ۱/۲ درصد آهن.....	۲۳۸
۵-۳-۲-۵- بررسی تاثیر بهسازی شیمیایی توسط استرانسیم و/یا منگنز و افزایش سرعت انجماد ( $15^{\circ}C/s$ ) بر رفتار سایشی دما بالای آلیاژ F۳۳۲ حاوی ۱/۲ درصد آهن.....	۲۴۶
فصل ششم: نتیجه گیری.....	۲۵۰
مراجع.....	۲۵۳
پیوست ها.....	۲۶۷

## فهرست جدولها

### فصل دوم: مروری بر منابع مطالعاتی

- جدول ۱-۲: ترکیب شیمیایی نوعی آلیاژ F۳۳۲..... ۴
- جدول ۲-۲: آلیاژهای معادل آلیاژ F۳۳۲ در استانداردهای مختلف..... ۴
- جدول ۳-۲: خواص مکانیکی آلیاژ F332.0-T5 در دماهای مختلف..... ۴
- جدول ۴-۲: مقایسه آلیاژهای آلومینیم مخصوص ریخته‌گری در قالب دائمی به لحاظ قابلیت ریخته‌گری، مقاومت به خوردگی، قابلیت ماشینکاری و جوش پذیری..... ۴
- جدول ۵-۲: خلاصه‌ای از تحقیقات انجام شده در زمینه تاثیر عوامل مختلف بر رفتار سایشی آلیاژهای Al-Si... ۲۲
- جدول ۶-۲: مهمترین فازهای موجود در آلیاژهای هیپوئوتکتیک Al-Si..... ۳۳
- جدول ۷-۲: ساختار بلوری و پارامتر شبکه ترکیبات بین فلزی غنی از آهن..... ۳۵
- جدول ۸-۲: تاثیر عوامل مختلف بر ترکیبات بین فلزی صفحه ای شکل  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi..... ۴۱

### فصل سوم: مواد و روش پژوهش

- جدول ۱-۳: ترکیب شیمیایی اولیه و کدهای مورد استفاده برای آلیاژهای مورد استفاده در پژوهش..... ۵۰
- جدول ۲-۳: مشخصات آزمایشهای سایش در این پژوهش..... ۶۰

### فصل چهارم: نتایج

- جدول ۱-۴: آنالیز شیمیایی آلیاژ پایه و سایر آلیاژهای مورد استفاده در این پژوهش، (Wt%)..... ۶۳
- جدول ۲-۴: ترکیب شیمیایی متوسط ترکیبات بین فلزی غنی از آهن..... ۶۷
- جدول ۳-۴: تاثیر سرعت انجماد بر مقدار متوسط SDAS و پارامترهای هندسی ذرات سیلیسیم یوتکتیک..... ۷۴
- جدول ۴-۴: اندازه متوسط و تعداد در واحد سطح ترکیبات چند ضلعی در دو آلیاژ ۱/۲FeMn و ۱/۲FeMn-CM..... ۷۷

- جدول ۴-۵: نتایج آنالیز EDS سطح پین آلیاژ پایه پس از سایش به مسافت  $1000\text{m}$  در دمای محیط، سرعت  $0.5\text{m/s}$  و بار اعمالی  $20\text{N}$ ..... ۹۸
- جدول ۴-۶: نتایج آنالیز EDS سطح پین آلیاژ پایه پس از سایش به مسافت  $1000\text{m}$  در دمای محیط، سرعت  $0.5\text{m/s}$  و بار اعمالی  $40\text{N}$ ..... ۹۹
- جدول ۴-۷: نتایج آنالیز EDS سطح پین آلیاژ  $0.7\text{Fe}$  پس از سایش به مسافت  $1000\text{m}$  در دمای محیط، سرعت  $0.5\text{m/s}$  و بار اعمالی  $20\text{N}$ ..... ۱۰۱
- جدول ۴-۸: نتایج آنالیز EDS سطح پین آلیاژ  $0.7\text{Fe}$  پس از سایش به مسافت  $1000\text{m}$  در دمای محیط، سرعت  $0.5\text{m/s}$  و بار اعمالی  $40\text{N}$ ..... ۱۰۲
- جدول ۴-۹: نتایج آنالیز EDS سطح پین آلیاژ  $1/8\text{Fe}$  پس از سایش به مسافت  $1000\text{m}$  در دمای محیط، سرعت  $0.5\text{m/s}$  و بار اعمالی  $20\text{N}$ ..... ۱۰۳
- جدول ۴-۱۰: نتایج آنالیز EDS سطح پین آلیاژ  $1/8\text{Fe}$  پس از سایش به مسافت  $1000\text{m}$  در دمای محیط، سرعت  $0.5\text{m/s}$  و بار اعمالی  $40\text{N}$ ..... ۱۰۵
- جدول ۴-۱۱: نتایج آنالیز EDS سطح پین آلیاژ  $1/8\text{FeMn}$  پس از سایش به مسافت  $1000\text{m}$  در دمای محیط، سرعت  $0.5\text{m/s}$  و بار اعمالی  $20\text{N}$ ..... ۱۰۶
- جدول ۴-۱۲: نتایج آنالیز EDS سطح پین آلیاژ  $1/8\text{FeMn}$  پس از سایش به مسافت  $1000\text{m}$  در دمای محیط، سرعت  $0.5\text{m/s}$  و بار اعمالی  $40\text{N}$ ..... ۱۰۷
- جدول ۴-۱۳: نتایج آنالیز EDS سطح پین آلیاژ پایه پس از سایش به مسافت  $1000\text{m}$  در دمای  $100^\circ\text{C}$ ، سرعت  $0.5\text{m/s}$  و بار اعمالی  $20\text{N}$  و  $40\text{N}$ ..... ۱۲۰
- جدول ۴-۱۴: نتایج آنالیز EDS سطح پین آلیاژ پایه پس از سایش به مسافت  $1000\text{m}$  در دمای  $200^\circ\text{C}$ ، سرعت  $0.5\text{m/s}$  و بار اعمالی  $20\text{N}$  و  $40\text{N}$ ..... ۱۲۱
- جدول ۴-۱۵: نتیجه آنالیز EDS سطح پین آلیاژ  $1/8\text{Fe}$  پس از سایش به مسافت  $1000\text{m}$  در دمای  $100^\circ\text{C}$ ، سرعت  $0.5\text{m/s}$  و بار اعمالی  $20\text{N}$ ..... ۱۲۲

- جدول ۱۶-۴: نتیجه آنالیز EDS سطح پین آلیاژ  $1/8Fe$  پس از سایش به مسافت  $1000m$  در دمای  $1000^{\circ}C$ ،  
 سرعت  $0.5m/s$  و بار اعمالی  $40N$ ..... ۱۲۴
- جدول ۱۷-۴: نتیجه آنالیز EDS سطح پین آلیاژ  $1/8Fe$  پس از سایش به مسافت  $1000m$  در دمای  
 $2000^{\circ}C$ ، سرعت  $0.5m/s$  و بار اعمالی  $20N$ ..... ۱۲۵
- جدول ۱۸-۴: نتیجه آنالیز EDS سطح پین آلیاژ  $1/8Fe$  پس از سایش به مسافت  $1000m$  در دمای  
 $2000^{\circ}C$ ، سرعت  $0.5m/s$  و بار اعمالی  $40N$ ..... ۱۲۶
- جدول ۱۹-۴: نتیجه آنالیز EDS سطح پین آلیاژ  $1/8FeMn$  پس از سایش به مسافت  $1000m$  در دمای  
 $1000^{\circ}C$ ، سرعت  $0.5m/s$  و بار اعمالی  $20N$ ..... ۱۲۷
- جدول ۲۰-۴: نتیجه آنالیز EDS سطح پین آلیاژ  $1/8FeMn$  پس از سایش به مسافت  $1000m$  در دمای  
 $1000^{\circ}C$ ، سرعت  $0.5m/s$  و بار اعمالی  $40N$ ..... ۱۲۸
- جدول ۲۱-۴: نتیجه آنالیز EDS سطح پین آلیاژ  $1/8FeMn$  پس از سایش به مسافت  $1000m$  در دمای  
 $2000^{\circ}C$ ، سرعت  $0.5m/s$  و بار اعمالی  $20N$ ..... ۱۳۰
- جدول ۲۲-۴: نتیجه آنالیز EDS سطح پین آلیاژ  $1/8FeMn$  پس از سایش به مسافت  $1000m$  در دمای  
 $2000^{\circ}C$ ، سرعت  $0.5m/s$  و بار اعمالی  $40N$ ..... ۱۳۱
- جدول ۲۳-۴: نتیجه آنالیز EDS سطح پین آلیاژ  $1/2FeSr-CM$  پس از سایش به مسافت  $1000m$  در دمای  
 محیط، سرعت  $0.5m/s$  و بار اعمالی  $20N$ ..... ۱۳۷
- جدول ۲۴-۴: نتیجه آنالیز EDS سطح پین آلیاژ  $1/2FeSr-CM$  پس از سایش به مسافت  $1000m$  در دمای  
 محیط، سرعت  $0.5m/s$  و بار اعمالی  $40N$ ..... ۱۳۸
- جدول ۲۵-۴: نتیجه آنالیز EDS سطح پین آلیاژ  $1/2FeSr-CM$  پس از سایش به مسافت  $1000m$  در دمای  
 $1000^{\circ}C$ ، سرعت  $0.5m/s$  و بار اعمالی  $40N$  و  $20$ ..... ۱۴۴
- جدول ۲۶-۴: نتیجه آنالیز EDS سطح پین آلیاژ  $1/2FeSr-CM$  پس از سایش به مسافت  $1000m$  در دمای  
 $2000^{\circ}C$ ، سرعت  $0.5m/s$  و بار اعمالی  $40N$  و  $20$ ..... ۱۴۴

جدول ۲۷-۴: مقادیر متوسط ضریب اصطکاک مربوط به ۵۰۰ متر آخر لغزش تحت بار ۲۰N و ۴۰N در سه دمای محیط، ۱۰۰°C و ۲۰۰°C..... ۱۴۶

### فصل پنجم: بحث

جدول ۱-۵: مقایسه آنالیز ترکیب شیمیایی رسوبات غنی از آهن به دست آمده در این پژوهش با آنالیز رسوبات غنی از آهن تعیین شده توسط سایر محققین ..... ۱۵۴

جدول ۲-۵: مقادیر سختی میکروسکوپی برخی از مهمترین اجزای موجود در ریزساختار آلیاژ F۳۳۲..... ۱۷۸

جدول ۳-۵: آنالیز شیمیایی EDS ذرات ناشی از سایش آلیاژ پایه پس از سایش به مسافت ۱۰۰۰m و سرعت لغزش ۰/۵m/s. (الف) بار اعمالی ۲۰N، (ب) بار اعمالی ۴۰N..... ۱۹۹

جدول ۴-۵: آنالیز شیمیایی EDS یک ناحیه معین بر روی ذره ناشی از سایش آلیاژ ۱/۸Fe پس از سایش تحت بار ۴۰N ارائه شده در شکل ۲۰-۵..... ۲۱۲



## فهرست شکلها

### فصل دوم: مروری بر منابع مطالعاتی

- شکل ۱-۲: جوانه زنی حفره و ترک در اطراف ذرات سیلیسیم در زیر سطح تماس، ذرات سیلیسیم یوتکتیک بر روی شکل مشخص گردیده اند..... ۱۱
- شکل ۲-۲: چگونگی اشاعه ترک زیر سطحی..... ۱۳
- شکل ۲-۳: دیاگرام شماتیک نواحی زیر سطح سایش نشان‌دهنده سه ناحیه مجزا در زیر سطح ناحیه ۱: لایه تریبولوژیکی، ناحیه ۲: ناحیه تغییر شکل پلاستیک (خفیف و شدید) و ناحیه ۳: ناحیه با تغییر شکل بسیار جزئی..... ۱۳
- شکل ۲-۴: مورفولوژی نوعی سطح پین پس از سایش خفیف (بالا) و سایش شدید (پایین)، (الف) تصویر میکروسکپ نوری، بار ۱۰N، سرعت ۰/۲ m/s، (ب) تصویر SEM، بار ۲۰N، سرعت ۰/۸ m/s، (پ) تصویر میکروسکپ نوری، بار ۹۸N، سرعت ۰/۸ m/s، (ت) تصویر SEM، بار ۹۸N، سرعت ۰/۸ m/s..... ۱۶
- شکل ۲-۵: مورفولوژی ذرات سایشی، (الف) ذرات ریز و هم محور تولید شده در بارها و سرعتهای لغزش کم (سایش خفیف)، (ب) توده های تیره رنگ آگلومره شده، بار ۱۰N و سرعت ۰/۸ m/s، (پ) ذرات سایشی صفحه‌ای تولید شده در رژیم سایش خفیف، بار ۵۰N، سرعت لغزش ۰/۸ m/s، (ت) ذرات سایشی تولید شده در رژیم سایش شدید، بار ۹۸N، سرعت لغزش ۰/۸ m/s..... ۱۸
- شکل ۲-۶: تصویر میکروسکپ الکترونی از نواحی زیر سطحی نمونه تحت سایش لغزشی، (الف) سایش خفیف، (ب) سایش شدید..... ۱۸
- شکل ۲-۷: تاثیر بار بر نرخ سایش آلیاژهای Al-Si، سرعت لغزش ۱ m/s..... ۲۲
- شکل ۲-۸: تاثیر مسافت لغزش بر حجم سایش آلیاژهای Al-Si، سرعت لغزش ۱ m/s، بار اعمالی ۱۹/۶ N..... ۲۳

- شکل ۹-۲: منحنی تغییرات حجم سایش بر حسب مسافت لغزش آلیاژ ۶۰۶۱، (الف) تغییرات خطی حجم سایش با مسافت لغزش در بارهای کم (سایش خفیف)، (ب) تغییر ناگهانی حجم سایش در بار ۹۸N (انتقال از رژیم سایش خفیف به شدید)..... ۲۵
- شکل ۱۰-۲: تاثیر سرعت لغزش بر نرخ سایش آلیاژهای Al-Si، بار اعمالی ۱۹/۶ N..... ۲۵
- شکل ۱۱-۲: تاثیر سرعت و زمان لغزش بر دمای سطح..... ۲۸
- شکل ۱۲-۲: تاثیر دمای سطح و درصد سیلیسیم بر نرخ سایش آلومینیم..... ۲۸
- شکل ۱۳-۲: تاثیر دمای سطح و درصد سیلیسیم بر ضریب اصطکاک آلومینیم..... ۲۸
- شکل ۱۴-۲: تاثیر میزان سیلیسیم بر نرخ سایش آلیاژهای Al-Si، بار اعمالی ۱۹/۶ N..... ۳۰
- شکل ۱۵-۲: گوشه آلومینیم دیاگرام سه تایی Al-Fe-Si..... ۳۳
- شکل ۱۶-۲: مورفولوژی ترکیبات بین فلزی غنی از آهن، (الف) مورفولوژی حروف چینی فاز آلفا (ب) مورفولوژی سوزنی فاز بتا..... ۳۵
- شکل ۱۷-۲: تصویر سطح شکست آلیاژ  $Al-9Si-2Cu-0.3Mg-1Fe$ ، (الف) شمای کلی از سطح شکست، (ب) فاز بتای صفحه ای شکل درون حفره انقباضی بین دندریتی، (پ) شبکه‌ی ترکهای ثانویه، (ت) شکست ترد فاز آلفا  $(\alpha-Al_{15}(Fe, Mn)_3Si_2)$ ..... ۳۸
- شکل ۱۸-۲: تاثیر افزودن منگنز بر طول متوسط بزرگترین سوزنهای بتا در آلیاژ ۳۱۹ آلومینیم..... ۴۱
- شکل ۱۹-۲: تاثیر فوق گداز بر ریزساختار و مورفولوژی فاز بتا در آلیاژ  $Al-6Si-0.4Fe$ ، (الف) فاز بتای صفحه ای شکل در فوق گداز  $750^{\circ}C$  پایدار است، (ب) فوق ذوب  $850^{\circ}C$  موجب تغییر مورفولوژی ترکیبات غنی از آهن و شکل‌گیری ترکیبات حروف چینی شده است..... ۴۵
- شکل ۲۰-۲: دمای بحرانی نگهداری مذاب بر حسب فاکتور جدایش چند آلیاژ Al-Si-Cu..... ۴۸

### فصل سوم: مواد و روش پژوهش

- شکل ۱-۳: روش اندازه‌گیری قطر متوسط ذرات بین فلزی با اشکال نامنظم..... ۵۴

شکل ۲-۳: (الف) تصویر شماتیک چگونگی استقرار پین بر روی دیسک و (پ) چگونگی قرارگیری کوره مقاومتی (المنتی) بر روی دستگاه..... ۵۷

### فصل چهارم: نتایج

شکل ۱-۴: (الف) ریزساختار آلیاژ پایه (F۳۳۲) در حالت ریختگی (محلول حکاکی HF ۰/۵٪)، (ب) طیف آنالیز عنصری و آنالیز ترکیب شیمیایی رسوبات سفید رنگ موجود در زمینه..... ۶۴

شکل ۲-۴: تاثیر افزودن آهن بر ریزساختار آلیاژ F۳۳۲، (الف) آلیاژ ۰/۷Fe، (ب) آلیاژ ۱/۲Fe، (پ) آلیاژ ۱/۸Fe و (ت) آلیاژ ۲/۵Fe، سوزنهای  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi بر روی تصاویر مشخص گردیده اند، (محلول حکاکی HF ۰/۵٪)..... ۶۵

شکل ۳-۴: طیف آنالیز عنصری یکی از رسوبات سوزنی شکل موجود در ریزساختار آلیاژهای حاوی آهن..... ۶۷

شکل ۴-۴: تغییرات (الف) طول متوسط، (ب) کسر حجمی و (پ) نسبت طول به عرض صفحات بتا در

آلیاژهای مختلف..... ۶۸

شکل ۴-۵: هیستوگرام توزیع فراوانی طول متوسط فازهای غنی از آهن در (الف) آلیاژهای ۰/۷Fe و ۱/۲Fe،

(ب) آلیاژهای ۱/۸Fe و ۲/۵Fe و (پ) آلیاژهای ۱/۲Fe-CM و ۱/۲FeSr-CM..... ۶۹

شکل ۴-۶: تاثیر افزودن منگنز بر ریزساختار آلیاژهای حاوی آهن، (الف) آلیاژ ۰/۷FeMn، تصویری در

بزرگنمایی بالاتر از ذرات غنی از آهن حروف چینی موجود در این آلیاژ در گوشه بالا سمت راست تصویر ارائه شده است، (ب) آلیاژ ۱/۲FeMn، (پ) آلیاژ ۱/۸FeMn و (ت) آلیاژ ۲/۵FeMn..... ۷۱

شکل ۴-۷: طیف آنالیز عنصری EDS ترکیبات بین فلزی غنی از آهن و منگنز، (الف) رسوبات حروف چینی، (ب) رسوبات ستاره ای شکل و (پ) رسوبات چند ضلعی..... ۷۲

شکل ۴-۸: مقایسه تغییرات کسر حجمی ترکیبات بین فلزی غنی از آهن بر حسب درصد آهن در آلیاژهای بهسازی شده و بهسازی نشده (سرعت انجماد ۳°C/s)..... ۷۳

شکل ۴-۹: مقایسه (الف) اندازه میانگین، (ب) محیط و (پ) مساحت رسوبات آلفای چند ضلعی در دو آلیاژ ۱/۸FeMn و ۲/۵FeMn..... ۷۴

- شکل ۱۰-۴: ساختار میکروسکوپی (الف) آلیاژ ۱/۲Fe-CM، (ب) آلیاژ ۱/۲FeSr-CM، (پ) تصویر (ب) در بزرگنمایی ۱۰۰۰، (ت) تصویر (ب) در بزرگنمایی ۵۰۰۰، (محلول حکاکی HF ۰/۵٪)..... ۷۶
- شکل ۱۱-۴: تصویر میکروسکپ نوری (الف) آلیاژ ۱/۲FeMn-CM و (ب) آلیاژ ۱/۲FeMnSr-CM، ترکیبات بین فلزی با مورفولوژی سوزنی توسط فلش سفید بر روی تصاویر مشخص گردیده اند (محلول حکاکی HF ۰/۵٪).... ۷۷
- شکل ۱۲-۴: تاثیر میزان آهن بر چگالی تئوری و ظاهری آلیاژ F۳۳۲ (الف) در شرایط بهسازی نشده و (ب) در شرایط بهسازی شده توسط منگنز..... ۷۹
- شکل ۱۳-۴: (الف) تاثیر میزان آهن بر درصد تخلخل آلیاژ F۳۳۲ در شرایط بهسازی نشده و بهسازی شده توسط منگنز، (ب) تاثیر افزایش سرعت انجماد از ۳°C/s به ۱۵°C/s و بهسازی توسط منگنز و استرانسیم بر درصد تخلخل آلیاژ F۳۳۲ حاوی ۱/۲ درصد آهن..... ۷۹
- شکل ۱۴-۴: تاثیر مقادیر مختلف آهن بر (الف) استحکام کششی و (ب) استحکام تسلیم و (پ) درصد ازدیاد طول آلیاژ F۳۳۲ در شرایط بهسازی نشده و بهسازی شده توسط منگنز..... ۸۰
- شکل ۱۵-۴: تاثیر سرعت انجماد ۱۵°C/sec بر (الف) استحکام کششی، (ب) استحکام تسلیم و (پ) درصد ازدیاد طول آلیاژ حاوی ۱/۲ درصد آهن در شرایط بهسازی نشده و بهسازی شده توسط منگنز و/یا استرانسیم... ۸۲
- شکل ۱۶-۴: تغییرات استحکام کششی و درصد ازدیاد طول آلیاژهای منتخب در دو دمای ۱۰۰ °C و ۲۰۰..... ۸۴
- شکل ۱۷-۴: تصویر میکروسکپ الکترونی سطح شکست نمونه کشش آلیاژ پایه..... ۸۶
- شکل ۱۸-۴: تصویر میکروسکپ الکترونی سطح شکست نمونه کشش، (الف) آلیاژ ۰/۷Fe، (ب) آلیاژ ۱/۸Fe، (پ) آلیاژ ۲/۵Fe و (ت) آلیاژ ۱/۸FeMn..... ۸۶
- شکل ۱۹-۴: تصویر میکروسکپ الکترونی سطح شکست آلیاژ پایه در دو بزرگنمایی مختلف، بروز شکست در تیغه های سیلیسیم بر روی شکل مشخص گردیده است..... ۸۷
- شکل ۲۰-۴: تصویر میکروسکپ الکترونی سطح شکست آلیاژ ۰/۷Fe در دو بزرگنمایی مختلف، بروز شکست در تیغه های سیلیسیم بر روی شکل مشخص گردیده است..... ۸۷
- شکل ۲۱-۴: تصویر میکروسکپ الکترونی سطح شکست آلیاژ ۱/۲Fe در دو بزرگنمایی مختلف..... ۸۹
- شکل ۲۲-۴: تصویر میکروسکپ الکترونی سطح شکست آلیاژ ۱/۸Fe در دو بزرگنمایی مختلف..... ۸۹