بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده مهندسی متالورژی و مواد

بررسی و مقایسه رفتار خستگی حرارتی در آلیاژهای آلومینیوم ۳۵۶ و ۴۱۳ ریخته شده به روشهای فومی و معمولی

دانشجو:

حسین قاسمی میانایی

اساتید راهنما:

دکتر مهدی دیواندری

دکتر حسین عربی

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی مواد

گرایش شناسایی و انتخاب مواد فلزی

تیر ۱۳۸۶

کلیه حقوق مادی و معنوی این پایان‌نامه متعلق به دانشگاه علم و صنعت ایران است.

تشکر و قدردانی

گام‌نهادن در دنیای علم و دانش جزء با چراغ هدایت معلم روشنگر میسر نخواهد بود.

با انجام این پروژه وظیفه خود می‌دانم که از زحمات و راهنماییهای ارزندهٔ اساتید بزرگوار، آقایان دکتر حسین عربی و دکتر مهدی دیواندری که در اجرای پروژه همواره با راهنماییها و حسن‌توجه خود، راه را بر این حقیر هموار کرده بودند کمال تشکر و قدردانی را داشته باشم.

از عزیزان محترم شرکت فوسکو که در تامین ملزومات ریخته‌گری با اینجانب همکاری داشته‌اند تشکر می‌کنم. از پرسنل محترم کارگاه مکانیک که در ساخت قطعات، کمک حال این حقیر بوده‌اند کمال تشکر دارم.

از دوستان عزیزم که در مراحل مختلف انجام پروژه و نوشتن پایان‌نامه مرا یاری داده‌اند، قدردانی می‌نمایم.

و سپاس بی‌پایان نثار خانوادهٔ عزیزم که همواره مشوق و قوت قلب این حقیر بوده‌اند.

چکیده

مقاومت به خستگی حرارتی یک خاصیت ذاتی و مجرد مواد محسوب نمی‌شود. خستگی حرارتی پدیدهٔ پیچیده‌ایست که به عوامل مختلفی از جمله خواص فیزیکی، خواص مکانیکی، ریزساختار، سیکلهای حرارتی، شکل و اندازهٔ قطعه بستگی دارد. به دلیل ماهیت پیچیدهٔ آن تاکنون تئوری کاملی که از یک تحلیل ریاضی سرچشمه گرفته شده باشد، برای بیان مقاومت به خستگی حرارتی و پیشگوئی آن ارائه نشده است. قطعاتی از جمله سیلندر، سرسیلندر و پیستون اتومبیل به شدت در معرض زوال ناشی از خستگی حرارتی قرار دارند. این قطعات غالبا از آلیاژهای آلومینیم – سیلیسیوم و همواره به روش ریخته‌گری تولید می‌شوند. از روشهای مدرن ریخته‌گری، روش استفاده از مدلهای تبخیرشونده (روش فومی) می‌باشد. در این پژوهش به منظور بررسی تاثیر نوع فرایند ریخته‌گری و نوع آلیاژ بر خواص خستگی حرارتی، در ابتدا نمونه‌هایی با دو آلیاژ آلومینیم ۳۵۶ و آلومینیم ۴۱۳ به دو روش استفاده از مدلهای تبخیرشونده و ریخته‌گری در ماسه، ریخته شده‌اند. جهت بررسی کمی و کیفی ریزساختار و عیوب در نمونه‌های مختلف، بررسیهای میکروسکوپی انجام شد. به منظور انجام آزمایشات خستگی حرارتی، دستگاه آزمون خستگی حرارتی طراحی و ساخته شد. در ادامه از نمونه-ها آزمایشات مکانیکی مختلف از جمله آزمایش کشش و آزمایش خستگی حرارتی به‌عمل آمده است. نتایج نشان می‌دهد، در نمونه‌هایی که با روش ریخته‌گری فومی تولید شده‌اند، عیوب ریخته-گری بیشتری حضور دارند. این اختلاف در آلیاژ آلومینیم ۴۱۳ بیشتر مشهود بود. در آلیاژ ۳۵۶ چگالی ترکهای خستگی حرارتی در نمونه‌هایی که به روش فومی تولید شده‌اند نسبت به نمونه‌های ریخته‌شده در ماسه، به طور محسوسی بیشتر است. همچنین در آلیاژ ۳۵۶ طول ترکهای خستگی در دو روش اختلاف چشمگیری ندارد. این رفتار در آلیاژ ۴۱۳ با اختلاف کمتری مشاهده می‌شود. به-طور کلی مقاومت به خستگی حرارتی در آلیاژ ۴۱۳ به مراتب از آلیاژ آلومینیم ۳۵۶ بالاتر می‌باشد. مطالعات شکست‌نگاری نشان داد که در آلیاژ ۳۵۶ ترکهای خستگی غالبا از حفرات بین‌دندریتی و بندرت از شکست ذرات سیلیسیم منشاء گرفتند. در حالی‌که در آلیاژ ۴۱۳ غالبا ترکها از شکست ذرات سیلیسیم و در مواردی کمتری نیز از حفره‌های داخلی ناشی شدند. اندازه ذرات سیلیسیم بعد از انجام آزمایشات خستگی حرارتی نیز بزرگتر شد.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل۱ مقدمه ۱

۱-۱. مقدمه ۲

فصل۲ مروری بر منابع مطالعاتی ۵

۲-۱. خستگی حرارتی ۶

۲-۱-۱. خستگی حرارتی - مکانیکی ۸

۲-۱-۲. شوک حرارتی ۱۱

۲-۱-۳. شروع و اشاعه ترک در خستگی حرارتی ۱۱

۲-۱-۴. عوامل موثر بر خستگی حرارتی ۱۴

۲-۱-۵. پیش بینی عمر خستگی حرارتی ۱۹

۲-۱-۶. خستگی حرارتی آلیاژهای آلومینیم ۲۱

۲-۱-۷. روشهای انجام آزمایش خستگی حرارتی ۲۴

۲-۱-۸. معیارهای سنجش مقاومت به خستگی حرارتی ۲۷

۲-۲. بررسی تاثیر فرایند ریخته‌گری و پارامترهای آن بر کیفیت قطعات ۲۸

۲-۲-۱. مقدمه ۲۸

۲-۲-۲. مروری بر فرایند تولید به روش ریخته‌گری فومی ۲۹

۲-۲-۳. مزایا و معایب روش ریخته‌گری فومی ۳۱

۲-۲-۴. عیوب در ریخته‌گری فومی ۳۱

۲-۲-۵. بررسی پارامترهای مهم بر شکل گیری عیوب در ریخته‌گری فومی ۳۶

۲-۲-۶. تاثیر جریان مذاب بر خواص مکانیکی آلیاژهای آلومینیم ۴۲

۲-۲-۷. تاثیر سیستم راهگاهی بر خواص مکانیکی قطعات ریختگی آلومینیم ۴۴

۲-۲-۸. مقایسه رفتار پر شدن قالب در ریخته گری فومی و ریخته‌گری با قالب توخالی ۴۶

فصل۳ روش تحقیق ۵۱

۳-۱. مقدمه ۵۲

۳-۲. ریخته‌گری ۵۴

۳-۲-۱. طراحی شکل و ابعاد نمونهٔ ریخته‌گی ۵۴

۳-۲-۲. طراحی سیستم راهگاهی ۵۴

۳-۲-۳. قالبگیری و انجام ذوبریزی ۵۷

3-2-4. آنالیز شیمیایی ۵۸

۳-۲-۵. کدگذاری نمونه‌های ریخته‌گری ۵۹

۳-۳. بررسی و دسته‌بندی عیوب نمونه‌های ریخته‌گری شده ۶۱

۳-۳-۱. بررسی چشمی ۶۱

۳-۳-۲. بررسی میکروسکوپی عیوب ۶۱
۳-۳-۳. اندازه‌گیری چگالی ۶۱
۳-۳-۴. رادیوگرافی ۶۲
۳-۴. عملیات حرارتی ۶۲
۳-۵. آزمایشهای مکانیکی و بررسیهای ساختاری ۶۲
۳-۵-۱. آزمایش کشش ۶۲
۳-۵-۲. آزمایش خستگی حرارتی ۶۳
۳-۵-۳. متالوگرافی ۶۸
۳-۵-۴. شکست نگاری ۶۸

فصل۴ **۶۹**

نتایج **۶۹**

۴-۱. آنالیز شیمیایی ۷۰
۴-۲. بررسی عیوب ریخته‌گری در نمونه‌های ریخته‌شده ۷۰
۴-۲-۱. اندازه‌گیری چگالی ۷۰
۴-۲-۲. بررسیهای چشمی ۷۱
۴-۲-۳. بررسیهای میکروسکوپی ۷۳
۴-۲-۴. رادیوگرافی ۷۶
۴-۳. فاصله بازوهای دندریتی ۷۷
۴-۴. آزمایشات مکانیکی ۷۹
۴-۴-۱. آزمایش کشش ۷۹
۴-۴-۲. آزمایش خستگی حرارتی ۸۰
۴-۴-۳. نتایج شبیه‌سازی ۸۳
۴-۵. متالوگرافی نوری ۸۴
۴-۶. بررسی ریزساختار و شکست‌نگاری توسط میکروسکوپ الکترونی ۸۷

فصل۵ **۹۷**

بحث و تحلیل نتایج **۹۷**

۵-۱. آنالیز شیمیایی ۹۸
۵-۲. عیوب ریخته‌گری ۹۸
۵-۲-۱. عیوب سطحی ۹۹
۵-۲-۲. عیوب داخلی ۱۰۱
۵-۲-۳. عیوب چین‌خوردگی ۱۰۳
۵-۳. فاصله بازوهای دندریتی ۱۰۵
۵-۴. آزمایشات مکانیکی ۱۰۷
۵-۴-۱. آزمایش کشش ۱۰۷
۵-۴-۲. مقایسه نتایج حاصل از آزمایشات خستگی حرارتی ۱۰۸
۵-۵. متالوگرافی ۱۲۱

فصل۶ ۱۲۳
نتیجه گیری ۱۲۳
مراجع ۱۲۵
پیوست الف ۱۳۰

فهرست اشکال

عنوان **صفحه**

فصل۱ مقدمه ۱

فصل۲ مروری بر منابع مطالعاتی ۵

شکل۲-۱. رفتار تنش و کرنش ایده ال در خستگی حرارتی[۳]..... ۹

شکل۲-۲. پاسخ متفاوت مواد به سیکلهای خستگی حرارتی. (الف): نرم شدن، (ب): سخت شدن[۳]..... ۱۰

شکل۲-۳. رشد ترک خستگی حرارتی در فولاد ابزار. (الف): ترک درون دانه ایی، (ب): ترک مرزدانه ایی[۸]..... ۱۲

شکل۲-۴. (الف): تشکیل ترکها به صورت شبکهٔ تار عنکبوتی در فولاد با کربن متوسط. (ب): تشکیل یک ترک سطحی و رشد آن در فولاد گرم کار[۹و۱۰]..... ۱۳

شکل۲-۵. تشکیل ترکهای خستگی حرارتی در فصل مشترک ذرات فاز دوم و زمینه در کامپوزیت آلومینیم تقویت شده با ذرات SIC [۱۳]..... ۱۵

شکل۲-۶. تاثیر متفاوت درصد نیکل بر سختی و خواص خستگی حرارتی در آلیاژ [۱Al Ni]..... ۱۶

شکل۲-۷. تاثیر دمای حداکثر بر مقاومت به خستگی حرارتی در (الف): فولاد ابزار، (ب): آلیاژ Al-Ni [۱و۸]..... ۱۷

شکل۲-۸. ارتباط کرنش پلاستیک و عمر خستگی حرارتی[۱۹]..... ۲۱

شکل۲-۹. تاثیر حداکثر دمای یک سیکل بر مقاومت به خستگی حرارتی آلیاژ [۳Al 2xxx-T4]..... ۲۳

شکل۲-۱۰. الف: تاثیر تغییرات دمایی در یک سیکل بر تنش، ب: تاثیر حداکثر دمای سیکل بر تنش ایجاد شده (آلیاژ Al319) [۴و۱۹]..... ۲۴

شکل۲-۱۱. شمایی از یک سیستم القائی جهت انجام آزمایش خستگی حرارتی[۲۳]..... ۲۵

شکل۲-۱۲. نمونه ای از سیکل حرارتی برای آزمایش خستگی حرارتی فولاد زنگ نزن[۲۳]..... ۲۶

شکل۲-۱۳. سیکل حرارتی استفاده شده برای آزمون خستگی حرارتی نمونه های چدنی[۲۴]..... ۲۶

شکل۲-۱۴. نمونه های استفاده شده جهت انجام آزمایش خستگی حرارتی[۷و۲۴]..... ۲۷

شکل۲-۱۵. شبکه ای از ترکهای تار عنکبوتی در فولاد 304L. با افزایش فاصله از سطح نمونه، چگالی ترکها کاهش میابد[۲۳]..... ۲۸

شکل۲-۱۶. شماتیک فرایند تولید به روش ریخته گری فومی[۲۷و۲۸و۲۹]..... ۳۰

شکل۲-۱۷. عدم خروج کامل محصولات ناشی از تجزیه فوم موجب تشکیل عیوب سطحی میشود[۳۰]..... ۳۲

شکل۲-۱۸. تصویر حفره های داخلی که در اثر به دام افتادن محصولات ناشی از تجزیه فوم تشکیل شده اند[۳۱]..... ۳۳

شکل۲-۱۹. دو نمونه از عیب چین پوستی که در محل برخورد دو جبهه مذاب ایجاد شده است[۳۰]..... ۳۴

شکل۲-۲۰. دو مدل انجمادی در انجماد مذاب در قالبهای توخالی [۳۱] ۳۵

شکل۲-۲۱. تصاویر عیوب نیامد در ریخته گری فومی[۳۰و۳۲]..... ۳۵

شکل۲-۲۲. تاثیر سرعت حرکت مذاب بر شکل گیری عیوب در ریخته گری فومی[۳۴] ۳۷

شکل۲-۲۳. تاثیر تعداد راهباره و نوع راهگاه بارریز بر میزان عیوب. (الف): چین خوردگی، (ب): تاولهای سطحی[۳۷]. ۳۹

شکل۲-۲۴. تاثیر ارتفاع بارریز (فشار متالواستاتیکی) بر منحنی جریان آلیاژ AB19 [۳۵] ۴۰

شکل۲-۲۵. مقایسه عمر خستگی نمونهٔ ریخته شده با جریان آرام و جریان آشفته[۳۹]..... ۴۳

شکل۲-۲۶. تصویر میکروسکوپ الکترونی از محلهای شروع ترک خستگی. (الف): از فیلم اکسیدی جدید، (ب): از فیلم اکسیدی قدیمی[۳۹]. ۴۴
شکل۲-۲۷. میکروساختار آلومینیم ریخته گری شده شامل: (الف): فیلم اکسیدی جدید، (ب): فیلم اکسیدی قدیمی[۴۲]. ۴۵
شکل۲-۲۸. تصویر میکروسکوپ الکترونی از سطح شکست پیستون. اشکال نشان دهندهٔ شروع ترک از حباب ایجاد شده در راس پیستون می باشند[۴۲]. ۴۶
شکل۲-۲۹. شمائی از نحوه پرشدن قالب در ریخته گری فومی [۲۷]. ۴۸
شکل۲-۳۰. مقایسه نسبی بین زمان و نحوهٔ پرشدن قالب در ریخته گری معمولی و ریخته گری فومی. (الف): ریخته گری معمولی، (ب): ریخته گری فومی [۴۸]. ۵۰

فصل۳ روش تحقیق **۵۱**

شکل۳-۱. شکل ۳-۱. جزئیات و ترتیب انجام آزمایشات ۵۳
شکل۳-۲. شکل و ابعاد نمونه های ریخته گری (ابعاد به میلیمتر). ۵۴
شکل۳-۳. شماتیک سیستم راهگاهی استفاده شده. ۵۵
شکل۳-۴. شکل و ابعاد سیستم راهگاهی استفاده شده (ابعاد به میلیمتر). ۵۶
شکل۳-۵. سیتم راهگاهی پهلوریز جهت تهیه نمونه های آزمایش کشش. ۵۶
شکل۳-۶. نمونه هایی از مدل چوبی و فومی استفاده شده. ۵۷
شکل۳-۷. شکل و ابعاد نمونه آزمایش کشش، مطابق استاندارد ASTM B-557M،[۵۰]. ۶۳
شکل۳-۸. شکل و ابعاد نمونه آزمایش خستگی حرارتی. ۶۴
شکل۳-۹. سیکل حرارتی استفاده شده جهت انجام آزمایش خستگی حرارتی. ۶۴
شکل۳-۱۰. تصویر دستگاه آزمایش خستگی حرارتی ساخته شده. ۶۶
شکل۳-۱۱. شمای کنترل کننده های دستگاه آزمایش خستکی حرارتی ساخته شده. ۶۷
شکل۳-۱۲. قسمتهای مختلف دستگاه آزمایش خستگی حرارتی ساخته شده. ۶۷

فصل۴ **۶۹**

نتایج **۶۹**

شکل۴-۱. (الف): تغییرات چگالی نمونه های ریخته شده از آلیاژ آلومینیم ۳۵۶ با دمای بارریزی.، (ب): تغییرات چگالی نمونه های ریخته شده از آلیاژ آلومینیم ۴۱۳ با دمای بارریزی. ۷۱
شکل۴-۲. مقایسهٔ عیب نفوذ مذاب در ماسه. (الف): آلیاژ آلومینیم ۳۵۶، (ب): آلیاژ آلومینیم ۴۱۳. ۷۳
شکل۴-۳. مقایسهٔ نسبی میزان عیوب سطحی در آلیاژ آلومینیم ۳۵۶. (الف): ریخته گری فومی، (ب): ریخته گری معمولی. ۷۳
شکل۴-۴. مقایسهٔ میزان حفرات داخلی در نمونه های ریخته شده. (الف): آلیاژ ۳۵۶، ریخته گری معمولی. (ب): آلیاژ ۳۵۶، ریخته گری فومی. (ج): آلیاژ ۴۱۳، ریخته گری معمولی. (د): آلیاژ ۴۱۳، ریخته گری فومی. ۷۴
شکل۴-۵. مقایسهٔ نسبی شکل و اندازهٔ عیوب داخلی. (آلیاژ آلومینیم ۳۵۶) (الف): ریخته گری معمولی، (ب): ریخته گری فومی. ۷۵
شکل۴-۶. مقایسهٔ نسبی شکل و اندازهٔ عیوب داخلی. (آلیاژ آلومینیم ۴۱۳) (الف): ریخته گری معمولی، (ب): ریخته گری فومی. ۷۵
شکل۴-۷. (الف): چین خوردگی سطحی در محل برخورد دو جبهه مذاب در آلیاژ آلومینیم ۳۵۶. (ب): چین خوردگی سطحی در محل برخورد دو جبهه مذاب در آلیاژ آلومینیم ۴۱۳. ۷۶
شکل۴-۸. تصاویر رادیوگرافی از نمونه های آلیاژ آلومینیم ۳۵۶. (الف): ریخته شده به روش معمولی، (ب): ریخته شده به روش فومی. ۷۷

شکل۴-۹. تصاویر رادیوگرافی از نمونه های آلیاژ آلومینیم ۴۱۳. (الف): ریخته شده به روش معمولی، (ب): ریخته شده به روش فومی. ۷۷
شکل۴-۱۰. تصویر میکروسکوپ استریو از دندریتهای رشد یافته در آلیاژ آلومینیم ۳۵۶ ..... ۷۸
شکل۴-۱۱. تصویر میکروسکوپ نوری از دندریتهای رشد یافته در آلیاژ ۴۱۳ ریخته شده به روش فومی..... **Error! Bookmark not defined.**
شکل۴-۱۲. مقایسهٔ نسبی استحکام تسلیم، استحکام کشش و درصد تغییر طول نسبی در نمونه های مختلف..... ۸۰
شکل۴-۱۳. سطح بررسی شده برای تعیین طول و چگالی ترکها به صورت هاشور نشان داده شده است. ۸۱
شکل۴-۱۴. مقایسهٔ نسبی توزیع ترکهای خستگی حرارتی در آلیاژ آلومینیم ۳۵۶. (الف): روش معمولی، (ب): روش فومی ۸۳
شکل۴-۱۵. مقایسهٔ نسبی توزیع ترکهای خستگی حرارتی در آلیاژ آلومینیم ۴۱۳. (الف): روش معمولی، (ب): روش فومی ۸۳
شکل۴-۱۶. توزیع تنش و کرنش در نمونهٔ خستگی حرارتی، آلیاژ آلومینیم ۳۵۶. ..... ۸۴
شکل۴-۱۷. توزیع تنش و کرنش در نمونهٔ خستگی حرارتی، آلیاژ آلومینیم ۴۱۳. ..... ۸۴
شکل۴-۱۸. مقایسهٔ سلولهای دندریتی در آلیاژ آلومینیم ۳۵۶. (الف): قبل از انجام آزمایش خستگی حرارتی، (ب): بعد از انجام آزمایش خستگی حرارتی. ۸۵
شکل۴-۱۹. مقایسه ریزساختار نمونهٔ آلیاژ آلومینیم (F)۳۵۶. (الف): قبل از انجام آزمایش خستگی حرارتی، (ب): بعد از انجام آزمایش خستگی حرارتی. ۸۶
شکل۴-۲۰. ریزساختار نمونهٔ آلیاژ آلومینیم T6-۳۵۶. (الف): قبل از انجام آزمایش خستگی حرارتی، (ب): بعد از انجام آزمایش خستگی حرارتی. ۸۶
شکل۴-۲۱. مقایسهٔ شکل و اندازهٔ ذرات سیلیسیم در آلیاژ آلومینیم ۴۱۳. (الف): قبل از اتجام آزمایش خستگی حرارتی، (ب): بعد از انجام آزمایش خستگی حرارتی. ۸۶
شکل۴-۲۲. تصویر میکروسکوپ الکترونی از (الف): حفره های بین دندریتی موجود در سطح (نقاط محصور در دایره) و جوانه زنی و رشد ترکهای خستگی از حفره ها (نوک پیکان سفید). (ب): تصویر حفرهٔ بین دندریتی در بزرگنمایی بالا. ۸۷
شکل۴-۲۳. تصویر میکروسکوپ الکترونی از سطح شکست خستگی حرارتی نمونهٔ آلیاژ ۳۵۶. (الف): نمای کلی سطح شکست، (ب): محل جوانه زنی ترک خستگی حرارتی که نشاندهندهٔ شروع ترک از فضای بین دندریتها میباشد..... ۸۸
شکل۴-۲۴. تصویر میکروسکوپ الکترونی از سطح شکست نمونهٔ آلیاژ آلومینیم ۳۵۶، (الف): حضور حفره در مناطق بین دندریت و سطح شکست نرم در اطراف آن، (ب): مرحلهٔ دوم رشد ترک خستگی حرارتی. ۸۸
شکل۴-۲۵. تصویر میکروسکوپ الکترونی از سطح شکست خستگی حرارتی در آلیاژ آلومینیم ۴۱۳. (الف): نمای کلی مقطع شکست، (ب): مناطق سفید رنگ نشاندهندهٔ مرحله رشد ترک خستگی (مرحلهٔ دوم) میباشد. ۸۹
شکل۴-۲۶. تصویر میکروسکوپ الکترونی از سطح شکست نمونه آلیاژ آلومینیم ۴۱۳. منطقهٔ هموار مربوط به ناحیهٔ رشد دندریتهای فاز آلفا میباشد. ناحیه ناهموار نیز یوتکتیک آلومینیم – سیلیسیم را نشان میدهد. ۹۰
شکل۴-۲۷. تصویر میکروسکوپ الکترونی از سطح اچ شدهٔ آلیاژ آلومینیم ۳۵۶ بعد از اعمال ۵۰۰ سیکل حرارتی. تیغه های سیلیسیم به وضوح در این تصاویر دیده میشوند. ۹۱
شکل۴-۲۸. تصویر میکروسکوپ الکترونی از سطح اچ شدهٔ نمونهٔ آلیاژ آلومینیم ۴۱۳ بعد از اعمال ۵۰۰ سیکل حرارتی. ۹۱
شکل۴-۲۹. (الف): تصویر الکترونهای برگشتی از محلهای شروع ترک خستگی حرارتی در نمونهٔ آلیاژ آلومینیم ۳۵۶. تصویر نشان میدهد بسیاری از ترکها از فضای بین دندریتها شروع شدهاند. (ب): تصویر الکترونهای برگشتی از تشکیل ترکهای خستگی حرارتی در ذرات سیلیسیم (نوک پیکان سفید). این ترکها منشاء شروع بسیاری از ترکهای خستگی در نمونه میباشند. ۹۲
شکل۴-۳۰. آنالیز منطقه ای از محل شروع ترک در نمونه آلیاژ۳۵۶. تصویر نشاندهندهٔ حضور ذرات سیلیسیم در محلهای شروع ترک خستگی حرارتی میباشد. ۹۲
شکل۴-۳۱. تصویر میکروسکوپ الکترونی از مکانهای شروع ترک خستگی حرارتی. این مکانها به دنبال شکست ذرات درشت سیلیسیم در آلیاژ آلومینیم ۴۱۳ در اثر اعمال سیکلهای حرارتی ایجاد شده اند. ۹۳

شکل۴-۳۲. تصویر میکروسکوپ از محل شروع ترک ناشی از شکسته شدن فصل مشترک ذرات سیلیسیم و زمینه در آلیاژ ۴۱۳.....۹۳
شکل۴-۳۳. سطح شکست در آلیاژ آلومینیم ۴۱۳، مناطق سفید رنگ نشاندهندهٔ حضور ترکیبات بین فلزی میباشد.۹۴
شکل۴-۳۴. آنالیز منطقه ای از سطح شکست نشان داده شده در شکل ۴-۲۳. حضور آهن منجر به تشکیل ترکیبات بین فلزی و ایجاد مناطق حساس به خستگی حرارتی میشود..... **Error! Bookmark not defined.**
شکل۴-۳۵. تصویر میکروسکوپ الکترونی از رشد ترک خستگی حرارتی در آلیاژ آلومینیم ۳۵۶. (الف): رشد ترک خستگی حرارتی در جهت عمود بر تنش کششی، (ب): در این تصویر تیزشدن و کندشدن نوک ترک به وضوح مشخص میباشد.۹۵
شکل۴-۳۶. تصاویر میکروسکوپ نوری از شروع ترک از عیوب چین خوردگی در نمونه های ریخته شده از آلیاژ آلومینیم ۳۵۶ و به روش فومی.....۹۵
شکل۴-۳۷. تصویر میکروسکوپ الکترونی از رشد ترک خستگی حرارتی در آلیاژ آلومینیم ۴۱۳.....۹۶

فصل۵ **۹۷**

بحث و تحلیل نتایج **۹۷**

شکل۵-۱. دیاگرام فازی آلومینیم و سیلیسیم[۵۲]. ..... **Error! Bookmark not defined.**
شکل۵-۲. مقایسه عیوب ریخته گری در نمونه های مختلف.....۱۰۰
شکل۵-۳. مقایسهٔ درصد تخلخل، متوسط اندازهٔ تخلخلها و اندازهٔ بزرگترین تخلخل در نمونه های مختلف. ۱۰۲
شکل۵-۴. مکانیزم تشکیل حفرات داخلی در ریخته گری فومی[۳۳]. ۱۰۳
شکل۵-۵. مکانیزم تشکیل عیوب چین خوردگی در ریخته گری فومی[۳۳]. ۱۰۴
شکل۵-۶. تصویر عیب چین خوردگی در نمونهٔ آلیاژ ۳۵۶ ریخته شده به روش فومی (محصور در دایره). ۱۰۴
شکل۵-۷. مقایسه فاصله بازوهای دندریتهای ثانویه در نمونه های مختلف.....۱۰۶
شکل۵-۸. مقایسهٔ طول ترکهای سطحی در نمونه های آلیاژ آلومینیم ۳۵۶، ریخته شده به دو روش فومی و معمولی. ۱۰۹
شکل۵-۹. مقایسهٔ چگالی ترکهای سطحی در نمونه های آلیاژ آلومینیم ۳۵۶، ریخته شده به دو روش فومی و معمولی. ۱۱۱
شکل۵-۱۰. مقایسهٔ طول ترکهای سطحی در نمونه های آلیاژ آلومینیم ۴۱۳.....۱۱۲
شکل۵-۱۱. تصویر الکترونهای برگشتی از محل شکسته شدن ذرات سیلیسیم در دمای $350^{\circ}C$. بسیاری از ترکهای خستگی حرارتی از این مکانها شروع میشوند[۶۰]. ۱۱۴
شکل۵-۱۲. مقایسه چگالی ترکهای سطحی در نمونه های آلیاژ ۴۱۳، ریخته شده به دو روش فومی و معمولی..۱۱۵
شکل۵-۱۳. تاثیر تخلخلهای داخلی بر عمر خستگی حرارتی در دو آلیاژ آلومینیم ۳۱۹ و ۳۵۶[۴]. ۱۱۶
شکل۵-۱۴. مقایسه طول ترک ناشی از خستگی حرارتی در نمونه های مختلف ۱۱۷
شکل۵-۱۵. تصویر میکروسکوپ الکترونی از ترک خستگی حرارتی در محل برخورد دو جبهه مذاب.....۱۲۰
شکل۵-۱۶. آنالیز منطق های از محل شروع ترک در محل برخورد دو جبهه مذاب در آلیاژ ۳۵۶. **Error! Bookmark not defined.**
شکل۵-۱۷. ریزساختار آلیاژ Al-Si در حالت اصلاح شده. (الف): Si ۵٪، (ب): Si ۱۲/۶٪.....۱۲۱
شکل۵-۱۸. مقایسه میانگین اندازه ذرات سیلیسم قبل و بعد از آزمایش خستگی حرارتی. (الف): طول ذرات سیلیسیم، (ب): عرض ذرات سیلیسیم. ۱۲۲
شکل۵-۱۹. مقایسه نسبت طول به عرض ذرات سیلیسم قبل و بعد از آزمایش خستگی حرارتی. ۱۲۲

فصل۶ **۱۲۳**

نتیجه گیری **۱۲۳**

مراجع ۱۲۵

فهرست جداول

فصل۱ مقدمه ۱

فصل۲ مروری بر منابع مطالعاتی ۵

جدول۲-۱. تاثیر سرعت حرکت مذاب بر مقدار عیوب تشکیل شده در نمونه های دیسکی شکل[۳۰]. ۳۶

جدول۲-۲. تاثیر تعداد راهگاه بر میزان عیوب ایجاد شده. آلیاژ Al356 ، دمای ریختگی^{c}°۸۵۰ [۳۵] . ۳۸

فصل۳ روش تحقیق ۵۱

جدول۳-۱. نمونه های آزمایش کشش ۵۹

جدول۳-۲. کد نمونه های خستگی حرارتی ۶۰

فصل۴ ۶۹

نتایج ۶۹

جدول۴-۱. ترکیب شیمیایی آلیاژهای استفاده شده. ۷۰

جدول۴-۲. مقادیر میانگین چگالی برای نمونه های مختلف (۲و۱=N). ۷۰

جدول۴-۳. مقادیر عیوب سطحی در نمونه های مختلف(۲و۱=N). ۷۲

جدول۴-۴. نتایج بررسی میزان تخلخل با استفاده از آنالیزگر تصویری ۷۵

جدول۴-۵. فاصله بازوهای دندریتی در نمونه های مختلف ۷۸

جدول۴-۶. نتایج میانگین آزمایش کشش نمونه های ریخته گری(۳و۲و۱=N). ۷۹

جدول۴-۷. نتایج حاصل از اندازه گیری طول ترکهای خستگی حرارتی در سیکلهای حرارتی مختلف. ۸۱

جدول۴-۸. نتایج حاصل از اندازه گیری چگالی ترکهای تشکیل شده در سیکلهای حرارتی مختلف. ۸۲

جدول۴-۹. نتایج آنالیز تصویری ذرات سیلیسیم قبل و بعد از آزمایش خستگی حرارتی. ۸۵

فصل۵ ۹۷

بحث و تحلیل نتایج ۹۷

جدول۵-۱. برخی از خواص فیزیکی مذاب آلومینیم (۳۵۶) و پلی استیرن[۵۴،۵۵] ۱۰۷

جدول۵-۲. خواص حرارتی آلومینیم و سیلیسیم[۶۱و۶۲]. ۱۱۳

جدول۵-۳. برخی از خواص فیزیکی آلیاژ ۳۵۶ و آلیاژ ۴۱۳[۵۳]. ۱۱۹

فصل۶ ۱۲۳

نتیجه گیری **۱۲۳**

مراجع **۱۲۵**

پیوست الف **۱۳۰**

فهرست علائم اختصاری

فصل۱

مقدمه

۱-۱. مقدمه

زمانی که سطح یک فلز گرم می‌شود، این سطح به علت پیوستگی با سطح سرد زیرین، به توسط سطح زیرین، تحت تنش فشاری قرار می گیرد. در هنگام سرد شدن تنش بر عکس شده و سطح بیرونی تحت تنش کششی قرار می‌گیرد. در طی سیکل گرم‌شدن و سردشدن سطح تحت فرایند خستگی حرارتی قرار گرفته و دچار شکست می‌شود. لازم به ذکر است که خستگی حرارتی حتی در حالتهایی که نمونه به طور یکنواخت تحت گرما و سرما قرار می‌گیرد نیز رخ می‌دهد. محدودیتهای داخلی مثل جهتگیری مختلف دانه ها، ناهمسانگردی در ضریب انبساط حرارتی در کریستالهای خاص، اختلاف ضریب انبساط حرارتی ذرات فاز دوم و زمینه در آلیاژهای دوفازی از عوامل پیدایش خستگی حرارتی هستند. پدیدهٔ خستگی حرارتی در قطعاتی از جمله تیغه‌های توربین، سرسیلندر، غلتکهای نورد، محفظه واکنش راکتور مشاهده می‌شود. خستگی حرارتی عامل اصلی کاهش عمر قطعاتی از جمله پیستون اتومبیل و قالبهای ریخته‌گری تحت فشار می‌باشد[۱و۲].

در بیشتر موارد تغییر شکل و آسیب ناشی از خستگی، در خستگی حرارتی قابل پیش بینی نیست. بنابر این آزمایشات خستگی حرارتی برای بررسی و ارائه میزان تنش- کرنش و تکامل خستگی انجام می شود. تاثیر خواص فیزیکی و مکانیکی یک ماده بر مقاومت به خستگی حرارتی به نحوه اعمال سیکلهای حرارتی بستگی دارد. در حالتی که سیکل خستگی حرارتی با سرعت بالا به ماده اعمال می شود، (شوک حرارتی)، خواص فیزیکی بیشترین تاثیر را بر مقاومت به خستگی نشان خواهند داد[۱]. بر خلاف فولادها، افزایش استحکام اغلب آلیاژهای غیرآهنی با افزایش متناسب خواص خستگی همراه نمی‌باشد. بنابراین جهت حصول خواص خستگی مناسب در آلیاژهای آلومینیم ، استفاده از روشهای تولید مطمئن اجتناب ناپذیر می‌باشد.

از روشهای متداول در تولید قطعات آلومینیم ی، روش ریخته‌گری می‌باشد. در حال حاضر محصولات ریختگی آلومینیم ، حدود ۲۰ درصد مصرف این فلز را تشکیل می دهند. متاسفانه در روش ریخته‌گری ریزساختار خشن و عیوب ریختگی متنوع در قطعه تشکیل می شود. از مسائل بسیار

مهم در فرایند ریخته‌گری، نحوهٔ کنترل پارامترهای ریخته‌گری جهت حصول خواص بهینه می باشد. خواص ضعیف محصولات ریختگی از ریزساختار خشن و عیوب ریخته‌گری منشاء می‌گیرد. با توجه به موارد بیان شده، بررسی مکانیزمهای تشکیل عیوب در ریخته‌گری به منظور دستیابی به خواص مکانیکی بهینه ضروری می باشد. عیوب ریخته‌گری چه از نظر مکانیزم تشکیل و چه از نظر کمی و کیفی در روشهای مختلف ریخته‌گری متفاوت هستند. در تولید یک محصول به روش ریخته‌گری روشها و تکنولوژیهای متنوعی موجود است. هر روش مزایا و معایب مخصوص به خود را دارا می باشد. ریخته گری با مدلهای تبخیر شونده از روشهای نوین ریخته گری در ابعاد نزدیک به قطعه اصلی می باشد این روش اولین بار در سال ۱۹۵۸ توسط شرویر[1] ابداع گردید. درسال ۱۹۶۲ فلمینگ[2] استفاده از ماسه بدون چسب را تجربه کرد و در سال ۱۹۶۴ ریخته گری توپر با استفاده از ماسه بدون چسب توسط اسمیت[3] به ثبت رسید. در سال ۱۹۹۰ جامعه ریخته گران آمریکا نام عمومی ریخته گری با مدل مصرف شونده[4] را برای این فرایند انتخاب نمود. به دلیل مزایای عالی در این روش، پیش‌بینی می شود تا سال ۲۰۱۰ میلادی بیش از ۳۰ درصد قطعات ریختگی آلومینیم ی با این روش تولید شوند[۳]. در این روش مدل فومی ساخته شده توسط ماسهٔ خشک قالبگیری می شود. و نهایتا پر شدن قالب با ذوب و تجزیه مداوم فوم، خروج پسماندهای حاصل از تجزیه فوم از جدار پوشان و سپس جایگزین شدن مذاب در محفظه قالب، ریخته‌گری انجام می‌گیرد. لذا در این فرایند خواص فوم، پوشان و دیگر متغیرهای ریخته‌گری از قبل ارتفاع باراریزی مذاب، نحوهٔ طراحی سیستم راهگاهی، سرعت باراریزی و غیره، تاثیر بسزائی در الگوی جریان مذاب و در نتیجه ساختار میکروسکوپی، خواص و کیفیت قطعه تولید شده خواهند داشت. بسیاری از جنبه‌های روش مذکور بعلت نوپا بودن آن هنوز در مرز دانش بوده و نیازمند تحقیقات مستمر می باشد.

با توجه به اینکه از عوامل مهم و تاثیر گذار بر سلامت قطعات ریختگی، جریان سیال می‌باشد، در

[1] H.F.Shroyer
[2] M.C.Fleming
[3] T.R.Smith
[3] Wittmoser
[4] Expendable pattern casting

این پژوهش سعی شده است تاثیر روش ریخته‌گری که شامل روش فومی و روش معمولی بوده بر کیفیت قطعات ریخته‌گی مورد مطالعه قرار گیرد. ریخته‌گری با استفاده از دو آلیاژ آلومینیم ۳۵۶ و ۴۱۳ انجام شده است. از قطعات ریخته شده آزمایشهای مکانیکی مختلفی از جمله آزمایشهای خستگی حرارتی به عمل آمده است. با استفاده از آنالیز عیوب و نتایج آزمایشهای مکانیکی در نمونه-ها، تاثیر فرایند ریخته‌گری و نوع آلیاژ بر خواص مکانیکی قطعات ریختگی به طور کامل بررسی شده است.

فصل ۲

مروری بر منابع مطالعاتی

۲-۱. خستگی حرارتی

امروزه استفاده از قطعات ریختگی آلومینوم به خصوص جهت تولید اجـزاء اتومبیـل در جهـان در حال افزایش است. طبق آمـار تـا سـال ۲۰۱۰ مـیلادی میـانگین وزن قطعـات ریختگـی آلومینـوم در خودروهای سبک از میزان متوسط حاضر که ۹۰ کیلوگرم است به ۱۱۰ کیلوگرم افزایش می‌یابد. نیـاز صنعت به استفاده از آلیاژهای مناسـب و دارای خـواص مکـانیکی خـوب، اسـتحکام بـه وزن بـالا و ریخته‌گری آسان نیاز به استفاده از آلیاژهای آلومینوم را تشدید می‌کند. به منظـور بـالا بـردن قابلیـت اعتماد به آلیاژهای آلومینوم برخی از خواص آنها همچون مقاومت به خستگی حرارتی نیاز بـه بهبـود دارد[۲۱].

خستگی حرارتی پدیده‌ایست که در اثر اعمال سیکلهای حرارتی متناوب به قطعات و بروز ترک و اشاعه آن اتفاق می‌افتد. زمانی که سطح ماده ای گرم می شود، این سطح به علت پیوستگی بـا سـطح سرد زیرین و تحت تاثیر این سطح، تحت تنش فشاری قرار می‌گیرد. در هنگام سرد شـدن تـنش بـر عکس شده و سطح بیرونی تحت تنش کششی قرار می گیرد. در طی سیکل گرم و سرد شـدن سـطح تحت فرایند خستگی حرارتی قرار می‌گیرد[۱] .

گزارش شده است[۱]، خستگی حرارتی حتی در حالتهایی که نمونه به طور یکنواخت تحت گرما و سرما قرار می‌گیرد نیز رخ می‌دهد. محـدودیتهای داخلـی مثـل جهتگیـری مختلـف دانـه هـا و یـا ناهمسانگردی در ضریب انبساط حرارتی در کریستالهای خاص، (غیـر مکعبـی)، منجـر بـه خـستگی حرارتی می‌شود. در نتیجهٔ اعمال سیکلهای حرارتی، میکروساختار دچار زوال و آسیب می‌شـود. ایـن رفتار در فلزات خالص مثل اورانیوم، قلع، آلیاژهای پایه کادمیم و در فولادهـای دو فـازی کـه شـامل فریت و مارتنزیت می‌باشند، مشاهده می‌شود. خستگی حرارتی- مکانیکی[1] بیان کننده خستگی تحـت

[1] -Thermo Mechanical Fatigue