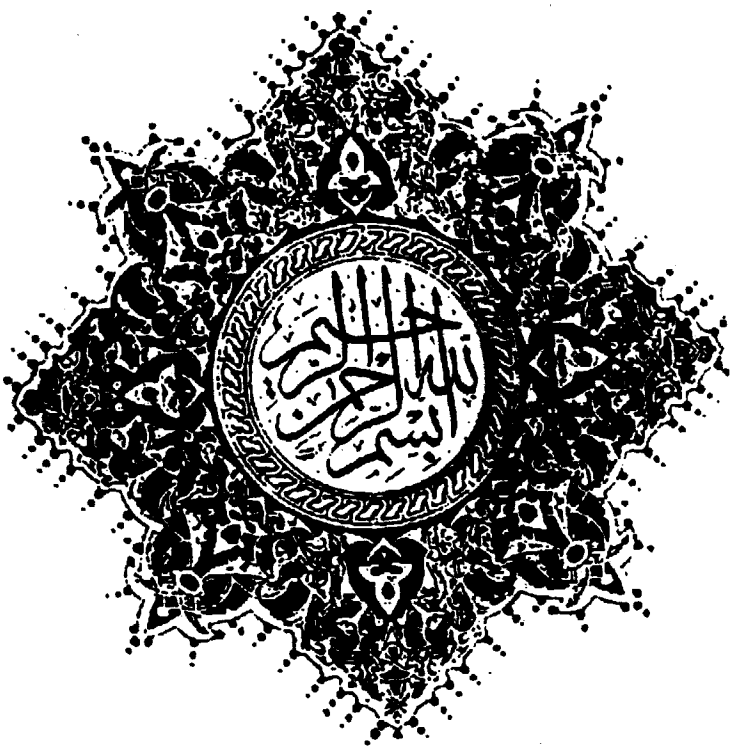


٣٠٩١٨

۱۳۷۹ /۵/ ۲۱

مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران
تکمیل مدارک

دانشگاه تهران

کنترل ریزساختار و خواص مکانیکی فولادهای ماراجینگ ریختگی

توسط
سیامک حسین نژاد

استاد راهنما
دکتر محمود نیلی احمدآبادی

استاد مشاور
دکتر مسعود امامی قمی

پایان نامه جهت دریافت درجه کارشناسی ارشد

در

مهندسی مواد - ریخته گری

۶۷۳۳۹

دانشکده فنی
گروه مهندسی متالورژی و مواد

زمستان ۷۸

۳۰۹۱۸

۱۳۷۹ /۴/ ۲۱

موضوع

کنترل ریزساختار و خواص مکانیکی فولادهای ماراجینگ ریختگی

توسط

سیامک حسین نژاد

پایان نامه جهت دریافت درجه کارشناسی ارشد

رشته مهندسی متالورژی و مواد

گرایش ریخته گری

از این پایان نامه در تاریخ ۲۲ /۹ /۱۳۷۸ در مقابل هیئت داوران دفاع بعمل آمد و مورد تصویب قرار گرفت.

۱- دکتر ایوب حلوایی

۲- دکتر حمیدرضا قاسمی منفرد راد

۳- دکتر محمود نیلی احمد آبادی

۴- دکتر مسعود امامی قمی

۵- دکتر پرویز دوامی

۶- دکتر حمید کاشانی

رییس گروه مهندسی متالورژی و مواد

سرپرست کمیته تحصیلات تکمیلی گروه

استاد راهنما

استاد مشاور

استاد مدعو

استاد مدعو

تقدیم به

پدر بزرگوار

مادر عزیز

وهمسر مهربانم

چکیده

کنترل ریزساختار و خواص مکانیکی فولادهای ماراجینگ ریختگی

توسط : سیامک حسین‌نژاد

استاد راهنما : دکتر محمود نیلی احمدآبادی

تاریخ دفاع : ۲۲ /۹ /۱۳۷۸

فولادهای ماراجینگ فوق مستحکم بوده و چقرمگی شکست بالایی دارند. بدلیل هزینه بالای تولید فولادهای ماراجینگ متداول (18Ni)، جایگزینی نیکل با عناصر ارزان قیمت از لحاظ اقتصادی مورد توجه است. طبق اطلاعات مولف، مطالعات محدودی روی فولادهای ماراجینگ ریختگی بخصوص نیکل ـ منگنزدار گزارش شده است. در این تحقیق تأثیر شرایط ذوب، جایگزینی نیکل با منگنز و افزودن تیتانیم روی خواص انجمادی و مکانیکی فولادهای ماراجینگ بررسی گردید. سه نوع ذوب در قالب فلزی ریخته‌گری شده و مورد بررسی قرارگرفت. نتایج نشان می‌دهد که فولاد ریختگی T250 استحکام کششی قابل مقایسه با گرید ۲۰۰ کار شده داشته ولی از درصد ازدیاد طول نسبی پایینی برخوردار است. فولادهای ریختگی Fe-10Ni-6Mo-3Mn و Fe-10Ni-6Mo-2.5Mn-0.7Ti خواص کششی گرید ۲۰۰ کار شده را دارند. افزودن تیتانیم و کاهش مقدار منگنز در فولاد Fe-10Ni-6Mo-3Mn سبب افزایش خواص کششی و تغییر مکانیزم شکست از مرز دانه‌ای نرم به داخل دانه‌ای ترد می‌گردد. ذوب فولادهای T250 و T300 تحت گاز محافظ نشان داد که در این روش آخال اکسیدی در ساختار فولاد وارد می‌شود که تأثیر منفی روی خواص مکانیکی آن دارد. با این روش خواص کششی گرید ۲۰۰ کار شده با ترکیب فولاد T250 کار شده بدست آمد.

تشکر و قدردانی

از استاد راهنمای بزرگوارم جناب **آقای دکتر محمود نیلی احمدآبادی** بخاطر راهنماییهای ارزشمند ، حمایت‌های بی دریغ و زحمات فراوانی که متحمل شده‌اند بی نهایت سپاسگزارم . از استاد مشاور بزرگوارم جناب **آقای دکتر مسعود امامی قمی** بخاطر راهنماییها و زحماتی که بخصوص در عملیات فولادسازی کشیدند و هم چنین از جناب **آقای دکتر پرویز دوامی** بخاطر بازخوانی پایان‌نامه کمال تشکر و قدردانی را بعمل می‌آورم .

از معاونت محترم طرح و برنامه **وزارت معادن و فلزات** بخاطر پشتیبانی مالی بخش عمدهٔ این تحقیق تشکر وقدردانی می‌کنم و هم چنین از کلیه عزیزانی که بنحوی مرا در انجام این تحقیق یاری نمودند سپاسگزارم.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول ـ مقدمه ۱

اهداف پروژه ۲

فصل دوم ـ مرور بر منابع ۴

۲-۱- انواع فولادهای ماراجینگ کار شده ۷

۲-۱-۱- فولادهای ماراجینگ ۱۸ نیکل کبالت دار ۷

۲-۱-۲- فولادهای ماراجینگ ۱۸ نیکل بدون کبالت ۸

۲-۱-۳- فولادهای ماراجینگ نیکل - منگنزدار ۸

۲-۱-۴- سایر انواع فولاد ماراجینگ ۹

۲-۲- فرآوری فولادهای ماراجینگ ۹

۲-۲-۱- فولادسازی ۹

۲-۲-۲- همگن کردن ۱۰

۲ـ۲ـ۳ـ آهنگری گرم ۱۲

۲-۲-۴- آنیل محلولی ۱۲

۲-۲-۵- پیر سختی ۱۴

۲-۳- ریز ساختار میکروسکوپی ۱۶

۲-۳-۱- فولادهای ماراجینگ ۱۸ نیکل بدون کبالت ۱۸

۲-۳-۲- فولادهای ماراجینگ نیکل - منگنزدار ۲۲

۲-۳-۳- آستنیت برگشتی ۲۴

۲-۳-۴- آخال در فولادهای ماراجینگ ۲۵

۲-۴- خواص مکانیکی ۲۷

۲-۵- مکانیزم‌های جوانه زنی و استحکام یابی ۳۴

۲-۶- مکانیزم شکست ۳۴
۲-۷- تأثیر عناصر آلیاژی ۳۶
۲-۷-۱- نیکل ۳۶
۲-۷-۲- مولیبدن ۳۶
۲-۷-۳- تیتانیم ۳۷
۲-۷-۴- منگنز ۳۸
۲-۷-۵- عناصر ناخالصی ۳۸
۲-۹- فولادهای ماراجینگ ریختگی ۳۹
فصل سوم - روش تحقیق ۴۲
۳-۱- تهیه و بررسی فولادهای ماراجینگ کار شده ۴۲
۳-۱-۱- ذوب، آلیاژسازی و ریخته گری ۴۳
۳-۱-۲- همگن کردن ۴۴
۳-۱-۳- آهنگری گرم ۴۴
۳-۱-۴- آنیل محلولی ۴۴
۳-۱-۵- پیرسختی ۴۴
۳-۲- تهیه و بررسی فولادهای ماراجینگ ریختگی ۴۴
۳-۲-۱- فولاد ماراجینگ ریختگی ۱۸ نیکل بدون کبالت ۴۵
۳-۲-۲- فولاد ماراجینگ نیکل - مولیبدن - منگنزدار ۴۵
۳-۲-۳- فولاد ماراجینگ نیکل - مولیبدن - منگنز - تیتانیم دار ۴۶
۳-۲-۴- عملیات حرارتی همگن کردن ۴۶
۳-۲-۵- عملیات حرارتی آنیل محلولی ۴۷
۳-۲-۶- عملیات حرارتی پیر سختی ۴۷
۳-۳- نمونه‌های کشش و ضربه ۴۷

۳-۴- انجام آزمایش ها ۴۸
فصل چهارم - نتایج ۴۹
۴-۱- ترکیب شیمیایی ۴۹
۴-۲- بررسی ریز ساختار میکروسکوپی ۵۰
۴-۲-۱- فولادهای کار شده ۵۰
۴-۲-۲- فولادهای ریختگی ۵۶
۴-۲-۲-۱- فولاد T ۵۶
۴-۲-۲-۲- فولاد M ۶۱
۴-۲-۲-۳- فولاد MT ۶۴
۴-۳- رفتار پیر سختی ۶۷
۴-۴- خواص مکانیکی ۶۹
۴-۵- بررسی سطوح شکست ۷۰
۴-۵-۱- فولادهای کار شده ۷۰
۴-۵-۲- فولادهای ریختگی ۷۴
۴-۵-۲-۱- فولاد T ۷۴
۴-۵-۲-۲- فولاد M ۷۹
۴-۵-۲-۳- فولاد MT ۸۳
فصل پنجم - بحث ۸۹
۵-۱- ترکیب شیمیایی ۸۹
۵-۲- ریزساختار میکروسکوپی ۸۹
۵-۲-۱- فولادهای کار شده ۸۹
۵-۲-۲- فولادهای ریختگی ۹۱
۵-۲-۲-۱- ساختار ریختگی AS Cast ۹۱

۵ـ۲ـ۲ـ۲ـ ریزساختار پیرسخت شده ۹۳
۵ـ۲ـ۳ـ آخال ها ۹۶
۵ـ۳ـ بررسی رفتار پیرسختی ۹۹
۵ـ۴ـ خواص مکانیکی ۱۰۲
۵ـ۴ـ۱ـ خواص کششی ۱۰۲
۵ـ۴ـ۲ـ انرژی ضربه ۱۰۴
۵ـ۶ـ سطوح شکست ۱۰۸
۵ـ۶ـ۱ـ فولادهای کارشده ۱۰۸
۵ـ۶ـ۲ـ فولادهای ریختگی ۱۰۹
فصل ششم ـ نتیجه گیری ۱۱۱
منابع و مراجع ۱۱۳

فصل اول

مقدمه

فولادهای ماراجینگ (Maraging Steels) خانواده‌ای از فولادهای مارتنزیتی با استحکام و چقرمگی شکست بالا هستند. در این فولادها میزان کربن پایین و در حد ناخالصی بوده و استحکام بسیار بالا با پیرسخت شدن مارتنزیت و تشکیل رسوبات بین فلزی حاصل می‌شود. فولادهای ماراجینگ بخاطر ترکیب بالای استحکام و چقرمگی، سهولت ساخت قطعات و عملیات حرارتی ساده مورد توجه هستند و در صنایع نظامی، هوا فضا و ابزار و قالب کاربردهای زیادی پیدا نموده‌اند.

فولادهای ماراجینگ با توجه به عناصر آلیاژی و روش‌های فولادسازی تحت خلاء نسبت به سایر فولادهای استحکام بالا دارای هزینهٔ تولید بسیار بالاتری هستند و تلاش های زیادی در جهت کاهش هزینهٔ تولید آنها با جایگزینی عناصر آلیاژی ارزان قیمت و تغییر روش‌های فولادسازی صورت گرفته است.

فولادهای ماراجینگ ۱۸ نیکل کبالت دار اولین و متداولترین گروه از خانوادهٔ فولادهای ماراجینگ هستند که شامل ۱۸ درصد نیکل، ۱۲-۸ درصد کبالت، ۵-۳ درصد مولیبدن و ۱/۵-۰/۳ درصد تیتانیم می‌باشند. افزایش شدید قیمت کبالت در اواخر دهه ۱۹۷۰ میلادی تولید این فولادها را با مشکل جدّی مواجه کرد و ضرورت بیشتری را برای تولید فولادهای ماراجینگ بدون کبالت ایجاد نمود. تلاش و تحقیق در این جهت سبب گردید که اوایل دهه ۱۹۸۰ میلادی گروهی جدید از فولادهای ماراجینگ با عنوان «فولادهای ماراجینگ ۱۸ نیکل بدون کبالت» تولید و معرفی شود. در این گروه حذف کبالت با افزایش مقدار تیتانیم جبران شده و خواص مکانیکی آنها با انواع کبالت دار قابل مقایسه می‌باشد.

تلاش‌های زیادی در جهت جایگزینی نیکل با منگنز در فولادهای ماراجینگ صورت گرفته است. نتایج نشان داده است که سیستم آلیاژی آهن - نیکل - منگنز قابلیت پیر سختی بالایی دارد ولی این آلیاژها در حالت پیر سخت شده بدلیل تردی و شکست مرزدانه‌ای خواص مکانیکی مطلوبی ندارند. در ترکیب‌های بخصوصی از آهن - نیکل - منگنز افزودن عناصر مولیبدن و تیتانیم سبب بهبود خواص مکانیکی شده است و فولادهای ماراجینگ نیکل - منگنز - مولیبدن/تیتانیم‌دار رفتار پیرسختی و

خواص مکانیکی قابل مقایسه با گریدهای پایین فولادهای ماراجینگ متداول را دارا می‌باشند.

با توجه به وجود عنصر آلیاژی فعال و به منظور پایین نگهداشتن میزان عناصر ناخالصی مضرّ عملیات ذوب و فولادسازی فولادهای ماراجینگ تحت خلاء صورت می‌گیرد. نتایج ذوب و فولادسازی فولادهای ماراجینگ ۱۸ نیکل کبالت دار و نیکل - منگنز دار تحت گاز محافظ نشان داده است که در گریدهای با استحکام پایین خواص مکانیکی قابل مقایسه با روشهای ذوب در خلاء حاصل می‌شود ولی درگریدهای با استحکام بالا اختلاف خواص مکانیکی قابل توجه بوده و استفاده از روش‌های ذوب در خلاء ضروری می‌باشد. طبق اطلاعات مؤلف، تأثیر روش ذوب اتمسفری یا تحت گاز محافظ بر خواص فولادهای ماراجینگ ۱۸ نیکل بدون کبالت بررسی نشده است.

فولادهای ماراجینگ ریختگی توسعه قابل توجهی را در مقایسه با انواع کار شدهٔ آن نیافته‌اند و بررسی‌های محدودی روی آنها انجام گرفته است. بررسی خواص مکانیکی و ریخته‌گری فولاد ماراجینگ ریختگی ۱۷ نیکل کبالت دار نشان داده است که این فولاد در حالت ریخته‌گری و عملیات حرارتی شده خواص مکانیکی خوبی داشته و از خواص ریخته‌گری مناسبی نیز برخوردار است. بر اساس اطلاعات مؤلف، هیچ گونه بررسی روی فولادهای ماراجینگ ریختگی ۱۸ نیکل بدون کبالت و نیکل منگنز دار صورت نگرفته است.

اهداف پروژه

تولید فولادهای ماراجینگ با خواص مکانیکی بهینه و هزینهٔ تولید پایین بستگی به استفاده از عناصر آلیاژی ارزان قیمت، انتخاب روش ذوب مناسب و کنترل ساختار متالورژیکی دارد. کاهش تعداد مراحل تولید قطعات نیز می‌تواند گام مؤثری در جهت کاهش هزینه تولید باشد که مزیّت تولید قطعات به روش ریخته گری را می‌رساند. بنابراین تولید قطعات ریختگی از فولاد ماراجینگ آنهم با عناصر آلیاژی ارزان قیمت می‌تواند در کاهش هزینه تولید فولاد خیلی مؤثر باشد. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که تحقیقات کمی بر روی فولادهای ماراجینگ نیکل - منگنز- مولیبدن و تیتانیم دار در حالت کار شده و خصوصاً ریختگی انجام گرفته است. در راستای مذکور، این تحقیق با هدف بررسی تأثیر شرایط ذوب و ریخته گری بر خواص مکانیکی فولاد ماراجینگ ۱۸ نیکل بدون کبالت و بررسی خواص مکانیکی

فولادهای ماراجینگ ریختگی ۱۸ نیکل بدون کبالت و نیکل - مولیبدن - منگنز / تیتانیم دار صورت گرفت و در جهت نیل به اهداف تحقیقات زیر انجام گردید.

۱- ذوب، آلیاژسازی، ریخته گری، آهنگری و عملیات حرارتی فولادهای ماراجینگ ۱۸ نیکل بدون کبالت (گریدهای T250 و T300) به روش ذوب القایی تحت گاز محافظ آرگون و بررسی ریز ساختار میکروسکوپی و خواص مکانیکی آنها.

۲- ذوب، آلیاژ سازی، ریخته گری و عملیات حرارتی فولاد ماراجینگ ۱۸ نیکل بدون کبالت (گرید T250) به روش ذوب القایی تحت خلاء و بررسی ریز ساختار و خواص مکانیکی آن درحالت ریخته‌گری و عملیات حرارتی شده.

۳- ذوب، آلیاژسازی، ریخته گری و عملیات حرارتی فولاد ماراجینگ با ترکیب شیمیایی Fe-10Ni-6Mo-3Mn به روش ذوب القایی اتمسفری و بررسی ریز ساختار و خواص مکانیکی آن در حالت ریخته گری و عملیات حرارتی شده.

۴- ذوب، آلیاژ سازی، ریخته گری و عملیات حرارتی فولاد ماراجینگ با ترکیب شیمیایی Fe-10Ni-6Mo-2.5Mn-0.7Ti به روش ذوب القایی تحت خلاء به منظور بررسی تأثیر تیتانیم بر ریز ساختار میکروسکوپی و خواص مکانیکی فولاد نیکل - مولیبدن - منگنزدار.

فصل دوم

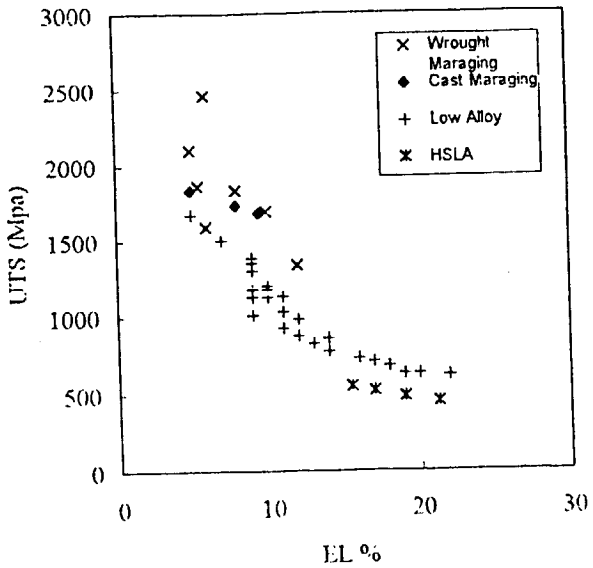
مرور بر منابع

تحقیقات اولیه انجام شده توسط Bieber بر روی آلیاژهای Fe-25Ni-Ti نشان داد که این آلیاژها به هنگام تمپر کردن افزایش سختی قابل ملاحظه‌ای می‌یابند که سبب گردید در سال ۱۹۵۸ میلادی محقق مذکور و Decker تحقیق بر روی آلیاژهای فوق را در شرکت بین المللی نیکل (Inco Ltd.) آغاز کردند. در نتیجهٔ این تحقیقات اولین فولاد ماراجینگ با ترکیب Fe-18.6Ni-6.9Co-4.6Mo-0.22Ti در کوره قوس الکتریک با ظرفیت 20000 Lb در سال ۱۹۶۰ تولید گردید [۱].

فولادهای ماراجینگ مارتنزیتی هستند. بدلیل مقدار کربن بسیار پایین ساختار مارتنزیتی این فولادها دارای سختی و استحکام پایینی می‌باشند و با پیر سخت کردن ساختار مارتنزیتی استحکام و سختی آن افزایش می‌یابد. عنوان این فولادها از پیر سخت کردن ساختار مارتنزیتی آنها گرفته شده است (Martensite + Aging→ Maraging)[۱-۴].

فولادهای ماراجینگ پر آلیاژی هستند و گروه‌های مختلف آن حاوی مقادیر متنوعی از عناصر نیکل، کبالت، مولیبدن، تیتانیم و منگنز می‌باشند. عناصر مذکور با تشکیل رسوبات بسیار ریز از قبیل Fe_2Mo, Ni_3Ti و NiMn سبب افزایش استحکام و سختی می‌شوند. میزان عناصر ناخالصی مثل کربن، سیلیسیم، گوگرد، فسفر و... در این فولادها بسیار پایین می‌باشد [۱-۳].

فولادهای ماراجینگ دارای استحکام بسیار بالا (Ultra High Strength) می‌باشند و در استحکام یکسان چقرمگی بالاتری را نسبت به فولادهای مارتنزیتی کوئنچ و تمپر شونده متداول نشان می‌دهند. در شکل (۱-۱) استحکام کششی بر حسب درصد ازدیاد طول نسبی برای فولادهای ماراجینگ بهمراه برخی از فولادهای استحکام بالا نشان داده می‌شود [۱, ۲, ۵].



شکل (۲-۱) - استحکام کششی برحسب درصد ازدیاد طول نسبی در فولادهای ماراجینگ و استحکام بالا [۵ ,۲ ,۱].

فولادهای ماراجینگ علاوه بر داشتن خواص مکانیکی عالی از نقطه نظر فرآوری نیز نسبت به فولادهای مارتنزیتی کوئنچ و تمپر شونده برتری نشان می‌دهند. درجدول (۲-۱) مقایسه بین فولادهای ماراجینگ و فولادهای مارتنزیتی کوئنچ و تمپره شوندهٔ استحکام بالای متداول و در جدول (۲-۲) مزایای خاص فولادهای ماراجینگ نشان داده می‌شود [۱].

جدول (۲-۱) - مقایسه بین فولادهای ماراجینگ و فولادهای کوئنچ و تمپر شونده [۱].

مراحل فرآوری فولادهای ماراجینگ	مراحل فرآوری فولادهای مارتنزیتی
فولاد آهنگری یا نورد گرم شده	فولاد آهنگری یا نورد گرم شده
ماشین کاری خشن	آنیل نرم سازی
تنش زدایی در صورت ماشین‌کاری خشن و غیریکنواخت	ماشین کاری خشن
ماشین کاری فولاد نرم تا ابعاد نهایی	تنش زدایی در صورت ماشین کاری خشن و غیریکنواخت
پیرسازی	ماشین کاری اولیه بادر نظرگرفتن تلرانس
پرداخت سطحی نهایی	سخت کاری با کوئنچ کنترل شده
	برگشت دادن
	ماشین کاری نهایی فولاد سخت شده
	پرداخت سطحی
مزایای استفاده از فولادهای ماراجینگ	
کاهش تعداد مراحل ماشین کاری	
انجام ماشین کاری روی فولادنرم	
کاهش تعداد مراحل عملیات حرارتی	
عملیات حرارتی ساده	