

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

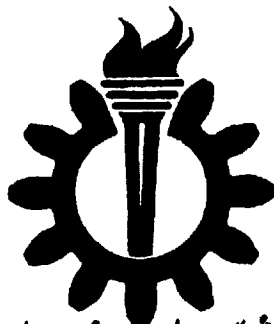
تقدیم به آستان پرمهر

**مهدا** (عج)

۱۳۷۸ / ۷ / ۱۲



بسمه تعالی



دانشگاه علم و صنعت ایران  
دانشکده مهندسی مواد و متالورژی

## بهبود سازی سیکل عملیات حرارتی فولادهای ماریجینگ

کازم سلیمانی استیاری

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد  
مهندسی مواد

اساتید راهنما:  
دکتر محمد رضا ابوطالبی  
دکتر جلیل وحدتی خاککی

3871

اسفند ۱۳۷۷

۲۷۴۲۷

## تقدیر و تشکر

بدینوسیله لازم میدانم از اساتید راهنمای پروژه آقایان دکتر ابوطالبی و دکتر وحدتی بخاطر سرپرستی پروژه، و نیز پرسنل محترم بخش مواد مجتمع تحقیقاتی صنعتی یامهدی (ع) - بویژه واحد عملیات حرارتی - بخاطر همکاریهایی که در جهت پیشبرد پروژه داشته‌اند تشکر نمایم.

همچنین مایلم بطور مشخص مراتب سپاس خود را از توجهات صمیمی آقای مهندس زواری و مساعی بیدریغ آقایان مهندس قادری و مهندس نجاتی در جهت اهداف پروژه ابراز نمایم. برای همه آنها آرزوی سلامت و بهروزی دارم.

## چکیده

فولادهای ماریجینگ از خانواده فولادهای با استحکام زیاد می‌باشند. مهمترین ویژگی این فولادها این است که علاوه بر داشتن استحکام کششی بسیار بالا و سختی زیاد، فوق‌العاده داکتیل و انعطاف پذیر هستند. از اینرو در کاربردهای حساس مهندسی و نظامی، آنجا که در کنار استحکام زیاد، انعطاف پذیری خوبی نیز مورد نیاز است بکار می‌روند. از پیدایش این فولادها بیش از چهل سال نمی‌گذرد و تکنولوژی تولید آن نیز در اختیار چند کشور صنعتی قرار دارد. در پژوهش حاضر ضمن معرفی فولادهای ماریجینگ، بهینه‌سازی سیکل عملیات حرارتی و پوشش‌دهی این فولادها مورد تحقیق قرار گرفته است.

عملیات حرارتی فولادهای ماریجینگ شامل عملیات حرارتی آنیل محلولی و پیرسازی می‌باشد که در این میان، فرایند پیرسازی فولادها بیشترین تأثیر را بر روی خواص مکانیکی نهایی قطعه داراست. از اینرو با انجام آزمایشاتی نقش پارامترهای آنیل محلولی و بوئزه پیرسازی (دما و زمان) روی استحکام کششی، سختی و مقاومت به ضربه شاری مورد بررسی قرار گرفت. بررسیهای انجام شده نشان داد که مناسبترین دما برای دستیابی سریع به حداکثر این خواص در محدوده دمایی  $520^{\circ}\text{C}$  -  $480^{\circ}\text{C}$  قرار دارد. مقدار دقیق این دما برای هر فولاد ماریجینگ بایستی بصورت مستقل مورد تحقیق قرار گیرد. با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایشهای انجام شده، بهینه شرایط عملیات حرارتی پیرسازی برای فولاد ماریجینگ C300، زمان  $2\text{hr}$  و دمای  $480^{\circ}\text{C}$  و برای فولاد ماریجینگ T250 زمان  $2\text{hr}$  و دمای  $500^{\circ}\text{C}$  تشخیص داده شد.

همچنین با استفاده از نمکهای اکسیدکننده مذاب، امکان ایجاد پوشش اکسیدی مقاوم در برابر خوردگی مورد بررسی قرار گرفت. آزمایشات انجام شده نشان داد که میتوان از این روش بطور موفقیت آمیزی استفاده نمود.

# فهرست مطالب

صفحه

مقدمه

۱

بخش اول - مرور منابع

## فصل (۱) معرفی فولادهای ماریجینگ

- ۶ ۱-۱- معرفی فولادهای ماریجینگ
- ۷ ۲-۱- عناصر سازنده فولاد
- ۱۵ ۳-۱- ذوب و تهیه
- ۱۷ ۴-۱- کاربردها

## فصل (۲) متالورژی فیزیکی فولادهای ماریجینگ

- ۱۹ ۱-۲- خواص فیزیکی و مکانیکی
- ۱۹ ۲-۲- ساختار فازی فولاد
- ۲۰ ۱-۲-۲- استنیت
- ۲۲ ۲-۲-۲- مارتنزیت
- ۲۸ ۳-۲-۲- دگرگونی دو طرفه استنیت-مارتنزیت و عملیات ریزدانه کردن
- ۳۳ ۳-۲- عملیات حرارتی
- ۳۳ ۱-۳-۲- آنیل محلولی
- ۴۰ ۲-۳-۲- پیرسازی مارتنزیت
- ۵۱ ۴-۲- تردی فولاد ماریجینگ
- ۵۱ ۱-۴-۲- تردی حرارتی
- ۵۵ ۲-۴-۲- تردی هیدروژنی
- ۶۲ ۵-۲- عملیات سطحی فولاد

۶۳

۲-۵-۱- پوششهای نیتربیدی

۶۵

۲-۵-۲- پوششهای الکترولیتی

۶۵

۲-۵-۳- پوششهای اکسیدی

### فصل (۳) فرآیندهای پیرسازی فولادهای ماریجینگ

۶۹

۳-۱- هدف از پیرسازی

۶۹

۳-۲- مکانیزم پیرسازی

۷۰

۳-۲-۱- واکنشهای منظم شدن

۷۲

۳-۲-۲- واکنشهای رسوبدهی

۷۶

۳-۲-۳- مکانیزمهای استحکامدهی

۷۹

۳-۳- فازشناسی aging

۷۹

۳-۳-۱- رسوبات Ti (فاز  $\eta$ )

۸۲

۳-۳-۲- رسوبات Mo

۸۵

۳-۴- overage

بخش دوم - آزمایشها و نتایج

### فصل (۴) عملیات حرارتی

۹۴

۴-۱- پیرسازی در درجه حرارت‌های مختلف

۹۴

۴-۱-۱- پیرسختی دردمای  $480^{\circ}\text{C}$

۹۵

۴-۱-۲- پیرسختی دردمای  $500^{\circ}\text{C}$

۹۶

۴-۱-۳- پیرسختی دردمای  $520^{\circ}\text{C}$

۹۷

۴-۱-۴- مقایسه منحنیهای سخت شوندگی فولاد C300

۹۹

۴-۱-۵- مقایسه منحنیهای سخت شوندگی فولاد T250

۱۰۱

۴-۱-۶- سینتیک و مکانیزم رسوبدهی

- ۱۰۸ ۷-۱-۴- پیرسختی ازدیدگاه میکروسکوپی
- ۱۰۸ ۱-۷-۱-۴- مراحل پیرسختی در فولاد T250
- ۱۱۴ ۲-۷-۱-۴- مراحل پیرسختی در فولاد C300
- ۱۱۸ ۸-۱-۴- تأثیر دمای پیرسازی روی خواص مکانیکی
- ۱۲۱ ۲-۴- ترکیب عملیات آنیل محلولی و پیرسازی
- ۱۲۱ ۳-۴- پیرسازی دوگانه
- ۱۲۲ ۴-۴- بررسی فازهای رسوبی

### فصل (۵) عملیات سطحی

- ۱۲۷ ۱-۵- شناسایی پوشش قطعه فابریک
- ۱۲۸ ۲-۵- شناسایی پوشش حاصل از نمک age
- ۱۲۹ ۳-۵- روشهای ایجاد پوشش و فرایند پیشنهادی
- ۱۳۰ ۴-۵- ایجاد پوشش اکسیدی با استفاده از نمک اکسیدان
- ۱۳۱ ۱-۴-۵- خواص خوردگی پوشش حاصل
- ۱۳۵ ۲-۴-۵- ضخامت پوشش
- ۱۳۶ ۳-۴-۵- جنس پوشش

### فصل (۶) جمع بندی و نتیجه گیری

- ۱۴۱ مراجع



## فهرست تصاویر

### فصل (۱)

- شکل (۱-۱) نمودار فازی سیستم آهن - نیکل  
شکل (۲-۱) تأثیر تیتانیوم روی استحکام تسلیم  
شکل (۳-۱) تأثیر تیتانیوم روی برگشت استنیت  
شکل (۴-۱) تأثیر مولیبدن روی استحکام کششی  
شکل (۵-۱) تأثیر گوگرد روی انرژی ضربه

### فصل (۲)

- شکل (۱-۲) منحنی CCT فولادهای ماریچینگ  
شکل (۲-۲) تصویر میکروسکوپی TEM نمونه آنیل و کوئنچ شده  
شکل (۳-۲) ساختار میکروسکوپی بلوک - پاکت مارتنزیت  
شکل (۴-۲) منحنی استحاله استنیت به مارتنزیت  
شکل (۵-۲) الگوی سیکل ریزدانه کردن فولاد  
شکل (۶-۲) تأثیر دمای آنیل روی اندازه دانه ها  
شکل (۷-۲) رفتار رشد ایزوترمال رشد دانه با زمان  
شکل (۸-۲) اثر دمای آنیل محلولی روی خواص کششی در حالت پیر نشده  
شکل (۹-۲) اثر دمای آنیل محلولی روی خواص کششی در حالت پیر شده  
شکل (۱۰-۲) اثر دمای آنیل محلولی روی تافنس شکست  $K_{IC}$  و انرژی ضربه  $CVN$   
شکل (۱۱-۲) اثر دمای آنیل محلولی روی سختی پس از پیرسازی  
شکل (۱۲-۲) منحنی زمان پیر شدن - سختی برای فولادهای  $T$  و  $C$   
شکل (۱۳-۲) منحنی زمان پیر شدن - مقاومت الکتریکی برای فولادهای  $T$  و  $C$   
شکل (۱۴-۲) رفتار سخت شوندگی آلیاژ  $18Ni250$  در دماهای مختلف  
شکل (۱۵-۲) تأثیر دما و زمان پیرسازی روی مقاومت الکتریکی  
شکل (۱۶-۲) اثر دمای پیرسازی روی استحکام تسلیم و کششی فولاد  $T$   
شکل (۱۷-۲) اثر دمای پیرسازی روی خواص کششی فولاد  $C$   
شکل (۱۸-۲) افزایش دمای پیرسازی و پدیده  $TRIP$   
شکل (۱۹-۲) اثر دمای پیرسازی روی انرژی ضربه  
شکل (۲۰-۲) منحنی مقدار  $K_{IC}$  بر حسب استحکام تسلیم فولاد  $T$   
شکل (۲۱-۲) اثر دمای پیرسازی روی مقدار  $K_{IC}$  فولاد  $C$   
شکل (۲۲-۲) واکنشهایی که در سرد شدن از دمای بالا اتفاق می افتند  
شکل (۲۳-۲) اثر فشار هیدروژن روی سرعت رشد ترک  
شکل (۲۴-۲) سطح شکست فولاد ماریچینگ ...  
شکل (۲۵-۲) منحنی تست بار ثابت برای شکست ...

- شکل (۲-۲۶) منحنی مقدار هیدروژن آزاد شده برحسب کرنش نمونه آنیل شده  
 شکل (۲-۲۷) منحنی مقدار هیدروژن آزاد شده برحسب کرنش نمونه آنیل نشده  
 شکل (۲-۲۸) منحنی مقدار هیدروژن آزاد شده برحسب تنش نمونه ماریچ شده  
 شکل (۲-۲۹) منحنی آهنگ آزاد شدن هیدروژن برحسب تنش نمونه ماریچ شده  
 شکل (۲-۳۰) سطح شکست فولاد ماریچینگ ...

### فصل (۳)

- شکل (۳-۱) نمودار فازی Fe-Co  
 شکل (۳-۲) نمودار فازی Fe-Ni  
 شکل (۳-۳) نمودار افزایش سریع سختی فولاد در دماهای مختلف  
 شکل (۳-۴) منحنی  $\log t$  برحسب  $1/T$   
 شکل (۳-۵) نمودار فازی Ni-Ti  
 شکل (۳-۶) نمودار فازی Fe-Mo  
 شکل (۳-۷) اعوجاج شبکه اتمی مارتزیت بواسطه رسوب  $Ni_3Mo$

### فصل (۴)

- شکل (۴-۱) منحنی های سخت شوندگی در دمای  $480^\circ C$   
 شکل (۴-۲) منحنی های سخت شوندگی در دمای  $500^\circ C$   
 شکل (۴-۳) منحنی های سخت شوندگی در دمای  $520^\circ C$   
 شکل (۴-۴) منحنی های سختی فولاد C300 در دماهای مختلف  
 شکل (۴-۵) منحنی های سختی فولاد T250 در دماهای مختلف  
 شکل (۴-۶) منحنی  $LnLn[1/(1-a)]$  برحسب  $Ln t$  در دمای  $480^\circ C$   
 شکل (۴-۷) منحنی  $LnLn[1/(1-a)]$  برحسب  $Ln t$  در دمای  $500^\circ C$   
 شکل (۴-۸) منحنی  $LnLn[1/(1-a)]$  برحسب  $Ln t$  در دمای  $520^\circ C$   
 شکل (۴-۹) منحنی  $LnLn[1/(1-a)]$  برحسب  $Ln t$  برای فولاد C300 در دماهای مختلف  
 شکل (۴-۱۰) منحنی  $LnLn[1/(1-a)]$  برحسب  $Ln t$  برای فولاد T250 در دماهای مختلف  
 شکل (۴-۱۱) منحنی  $\log t$  برحسب  $1/T$  برای فولادهای T250 و C300  
 شکل (۴-۱۲) تصویر میکروسکوپی فولاد T250 پیر شده در  $3min$  و  $480^\circ C$   
 شکل (۴-۱۳) تصویر میکروسکوپی فولاد T250 پیر شده در  $60min$  و  $500^\circ C$   
 شکل (۴-۱۴) آنالیز EDAX رسوب ...  
 شکل (۴-۱۵) تصویر میکروسکوپی فولاد T250 پیر شده در  $4hr$  و  $480^\circ C$   
 شکل (۴-۱۶) آنالیز EDAX رسوب ...  
 شکل (۴-۱۷) تصویر میکروسکوپی فولاد T250 پیر شده در  $7hr$  و  $480^\circ C$   
 شکل (۴-۱۸) تصویر میکروسکوپی فولاد C300 پیر شده در  $3min$  و  $480^\circ C$

- ۱۱۵ شکل (۴-۱۹) تصویر میکروسکوپی فولاد C300 پیر شده در  $480^{\circ}\text{C}$  و  $2\text{hr}$
- ۱۱۶ شکل (۴-۲۰) آنالیز EDAX رسوب ...
- ۱۱۶ شکل (۴-۲۱) آنالیز EDAX زمینه ...
- ۱۱۷ شکل (۴-۲۲) تصویر میکروسکوپی فولاد C300 پیر شده در  $480^{\circ}\text{C}$  و  $9\text{hr}$
- ۱۲۰ شکل (۴-۲۳) منحنی کرنش - تنش فولاد C300
- ۱۲۰ شکل (۴-۲۴) منحنی کرنش - تنش فولاد T250
- ۱۲۳ شکل (۴-۲۵) طیف XRD فولاد T250 پیر نشده
- ۱۲۳ شکل (۴-۲۶) طیف XRD فولاد T250 پیر شده
- ۱۲۴ شکل (۴-۲۷) طیف XRD فولاد C300 پیر نشده
- ۱۲۴ شکل (۴-۲۸) طیف XRD فولاد C300 پیر شده

### فصل (۵)

- ۱۲۸ شکل (۵-۱) طیف XRD پوشش نمونه فابریک
- ۱۲۹ شکل (۵-۲) طیف XRD پوشش نمک *age*
- ۱۳۲ شکل (۵-۳) منحنی مقدارافت وزن در محلول خورنده
- ۱۳۲ شکل (۵-۴) منحنی مقدار عنصر آلیاژی موجود در محلول خورنده برای نمونه های پیر نشده
- ۱۳۳ شکل (۵-۵) منحنی مقدار عنصر آلیاژی موجود در محلول خورنده برای نمونه های پیر شده
- ۱۳۴ شکل (۵-۶) نتایج آزمایش *Salt Spray*
- ۱۳۶ شکل (۵-۷) طیف XRD پوشش نمک اکسیدان

## مقدمه

فولادهای ماریجینگ از خانواده فولادهای با استحکام بسیار بالا هستند که استحکام آنها چندین برابر استحکام فولادهای کربنی سخت شده می‌باشد. ویژگی برجسته این فولادها، علاوه بر استحکام بالا، داشتن تافنس شکست بسیار عالی است. بطوریکه مجموع این دو ویژگی را در فولادهای دیگر به ندرت می‌توان یافت. لذا قطعات بسیار محکم و در عین حال انعطاف‌پذیر و مقاوم در برابر شکست را براحتی می‌توان با این فولاد تولید کرد. علاوه بر دو عامل فوق، خواص خستگی عالی، سهولت فراوری ترمومکانیکی، عملیات حرارتی، ماشینکاری و جوشکاری آنها، ارزش و بهایی بسیار بالا به این فولادها بخشیده است. بطوریکه کاربرد آنها به زمینه‌هایی که توجیه اقتصادی قوی وجود داشته باشد محدود شده است. این محدوده خود طیف وسیعی از صنایع نظامی، هوافضا، آب‌فضا (Hydrospace)، اتومبیل سازی و ابزارسازی را دربرمیگیرد. قیمت بالای این فولادها عملاً با کاهش مراحل تولید و ماشینکاری و عدم نیاز به تجهیزات عظیم و گرانبها برای فراوری و عملیات حرارتی قطعات جبران می‌شود. در کنار تمامی این مزایا، فولادهای ماریجینگ (به جز گروه Cr دار) از نظر ویژگیهای سطحی ضعیف بوده و برای مصارف حساس انجام عملیات سطحی بر روی این فولادها ضروری است.

واژه "maraging" واژه‌ای ترکیبی است که از دو عبارت aging و martensite تشکیل شده است. این نام را اولین بار آقای R. F. Decker به این فولادها اطلاق نمود، زیرا این فولادها دارای یک زمینه مارتزیتی نرم هستند که با عملیات پیرسازی به استحکام و سختی مطلوب می‌رسند. [۱].

## هدف و اهمیت پروژه

پروژه حاضر بخشی از یک پروژه مهندسی معکوس است که روی موشکهای ضد تانک انجام می‌گیرد. موتور پرتاب این موشکها قطعه ایست سیلندر مانند که از جنس آلیاژ ماریجینگ بوده و با مجموعه‌ای از عملیات ترمومکانیکی، ماشینکاری، عملیات حرارتی و عملیات سطحی تولید می‌شود. نقش پروژه حاضر در این مجموعه، بررسی و تعیین سیکل عملیات حرارتی و عملیات سطحی مناسب برای پاسخگونی به نیازهای طراحی مهندسی این قطعه بوده است.

## سابقه علمی پژوهشی در موضوع پروژه

بایدایش فولادهای ماریجینگ و انتشار نتایج تحقیقات اولیه در مورد ویژگیهای آن، دانشمندان

بررسیهای وسیعی را برای کشف خواص آن آغاز نمودند. ابتدا تلاش آنان به بررسی رفتار عملیات حرارتی و خواص مکانیکی فولادهای ماریجینگ اولیه معطوف شد. اما بدنبال استفاده از آنها در محور محرکه وسایل نقلیه، سیستمهای هوا فضا و موتور موشکها در سال ۱۹۶۱، و آشکار شدن سهولت عملیات حرارتی و فراوری آنها، زمینه‌های جدیدی از کاربرد آنها مورد توجه قرار گرفت. از اینرو محققین مواد گامهای جدی در تهیه انواع جدیدی از فولادهای ماریجینگ برداشتند که نتایج کار آنها عمدتاً بصورت Patent ارائه شده‌اند.

در حالیکه تحقیقات انجام شده در بیست سال اول، به بررسی ویژگیهای عملیات حرارتی، خواص مکانیکی، جوشکاری و خوردگی فولادهای ماریجینگ پرداخته‌اند، تنها در دهه آخر قرن است که ابزارهای دقیق، دانشمندان را در بررسی دقیق ریزساختارهای حاصل از انواع مختلف این فولاد و انواع عملیات حرارتی مورد استفاده یاری دادند. این بررسیها عمدتاً فرایندهای رسوبدهی را دربر گرفته و اطلاعات بسیار مفیدی پیرامون واکنشهای پیرسختی ارائه کرده‌اند که بهترین آنها، کار آقای Smith در سال ۱۹۹۴ در انگلستان است.

از نقطه نظر جغرافیایی، فولادهای ماریجینگ در ۱۹۵۸ در آمریکا تولید یافته‌اند. در ۱۹۶۱ تحقیقات روسها آغاز شد و در دهه ۱۹۷۰ ژاپن به آن توجه کردند. در سالهای بعد دانشمندان فرانسه، هلند و آلمان نیز به جرگه محققین ماریجینگ پیوستند. چینها و انگلیسیها کمی دیرتر از دیگران به فولادهای ماریجینگ پرداختند. بیشترین تحقیقات در مورد فولاد ماریجینگ هم اکنون در کشورهای هند و پاکستان انجام می‌شود.

### درباره این پروژه

در فاز مطالعاتی این پروژه، ابتدا کلیه کتب، مقالات و Patentهای مختلف مربوط به فولادهای ماریجینگ که دسترسی به آنها ممکن بود جمع آوری شد و در این کار تاکید خاصی بر جدید بودن مراجع اعمال شد. نگاهی به تعداد و سال انتشار مراجع انتهایی مجموعه حاضر مؤید این مدعا است. مطالب استخراج شده از مطالعه، مقایسه و انطباق این منابع سه فصل اول پایان نامه را تشکیل می‌دهند. در فصل اول چگونگی پیدایش این فولادها، روشهای تولید آنها و عناصر آلیاژی فولاد معرفی شده‌اند. فصل دوم، متالورژی فیزیکی فولادهای ماریجینگ و عملیات حرارتی و سطحی مختلف اشاره شده در مراجع را مورد بررسی قرار داده است. در فصل سوم فرایند پیرسازی این فولادها تا عمق بیشتری مورد کاوش قرار گرفته است.

در فصلهای چهارم و پنجم آزمایشات عملی روی دو نمونه از این فولادها آمده است. فصل چهارم آزمایشاتی را دربر میگیرد که برای دستیابی به بهترین سیکل عملیات پیرسازی انجام شده‌اند. فصل پنجم

نیز فرایند پوشش دهی آزمایش شده بر روی این فولادها را معرفی میکند.

در فصل آخر مطالعات عملی انجام شده، جمع بندی و با توجه به آزمایشات انجام شده، پیشنهاداتی برای

تحقیقات آتی ارائه شده است.

بخش اول

مرور منابع