٩ ٤١١٥
٤٦٨٣

بسم الله الرحمن الرحيم

٤١٩٩١

دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده فنی و مهندسی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی مواد
شناسایی و انتخاب مواد فلزی

۱۳۸۱ /۵/ ۱۰

تعیین شرایط بهینه تغییر شکل و عملیات حرارتی جهت افزایش چقرمگی یک فولاد فوق‌مستحکم

مسعود حاجی‌رضائی

مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران

استاد راهنما
دکتر محمد جهازی

استاد مشاور
دکتر امیر عبدا...زاده

بهار ۱۳۸۱

۴۱۹۶۱

دانشگاه تربیت مدرس

تاییدیه هیات داوران

۱۳۸۱ /۵/ ۱۰

آقای مسعود حاجی رضایی پایان‌نامه ۸ واحدی خود را با عنوان تعیین شرایط بهینه تغییر شکل و عملیات حرارتی جهت افزایش چقرمگی یک فولاد فوق مستحکم در تاریخ ۸۱/۲/۲۹ ارائه کردند. اعضای هیات داوران نسخه نهائی این پایان‌نامه را از نظر فرم و محتوی تایید و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی مواد - شناسایی با گرایش پیشنهاد می‌کنند.

اعضای هیات داوران	نام و نام خانوادگی	امضاء
۱ـ استاد راهنما :	آقای دکتر جهازی	
۲ـ استاد مشاور :	آقای دکتر عبداله زاده	
۳ـ استادان ممتحن :	آقای دکتر مالک	
	آقای دکتر اکبرزاده	
۴ـ مدیر گروه :	آقای دکتر اسدی	
(یا نمایندهٔ گروه تخصصی)		

این نسخه به عنوان نسخه نهایی پایان‌نامه/رساله مورد تأیید است.

امضای استاد راهنما:

٤١٩٦١

بسمه‌تعالی

آیین‌نامهٔ چاپ پایان‌نامه (رساله)های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرّس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان‌نامه (رساله)های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرّس، مبیّن بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه، دانش‌آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می‌شوند:

مادّهٔ ۱ در صورت اقدام به چاپ پایان‌نامه (رساله)ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اطلاع دهد.

مادّهٔ ۲ در صفحهٔ سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه)، عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد/رسالهٔ دکتری نگارنده در رشتهٔ ..... است که در سال ..... در دانشکدهٔ ..... دانشگاه تربیت مدرّس به راهنمایی سرکار خانم/جناب آقای دکتر ..... ، مشاورهٔ سرکار خانم/جناب آقای دکتر ..... و مشاورهٔ سرکار خانم/جناب آقای دکتر ..... از آن دفاع شده است.»

مادّهٔ ۳ به منظور جبران بخشی از هزینه‌های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت چاپ) را به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اهداکند. دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر در معرض فروش قرار دهد.

مادّهٔ ۴ در صورت عدم رعایت مادّهٔ ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ‌شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت مدرّس، تأدیه کند.

مادّهٔ ۵ دانشجو تعهد و قبول می‌کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می‌دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در مادّهٔ ۴ را از محلّ توقیف کتابهای عرضه‌شدهٔ نگارنده برای فروش، تأمین نماید.

مادّهٔ ۶ اینجانب مسعود حاجی رضائی دانشجوی رشته متالورژی مقطع کارشناسی ارشد تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می‌شوم.

نام و نام‌خانوادگی: مسعود حاجی رضائی

تاریخ و امضا: ۸۱/۳/۲۹

تقدیم به:

- پدر و مادر عزیز و فداکارم که جانانه سوختند و به من نور امید و محبت ارزانی داشتند.

- همسر فداکارم که با بردباری و صبر و تحمل سختیها و مشکلات بسیار مرا یار و همراه بود.

تقدیر و تشکر

در نگارش پایان‌نامه حاضر نگارنده از همراهی و همکاری صمیمانه عزیزان بسیاری برخـوردار بـود که ذکر نام تمامی آنها در این مجال ممکن نیست لیکن بحکم (من لم یشـکر المخلـوق لـم یشـکر الخالق) وظیفه خود می‌داند تقدیر و تشکر صمیمانه خود را بویژه تقدیم اشخاص ذیل نماید که در تهیه پایان‌نامه حاضر از هرگونه راهنمایی و مساعدت دریغ نداشته‌اند:

۱- جناب آقای دکتر محمد جهازی استاد محترم راهنما که علیرغم مشغله علمی و عملی فراوان با بزرگواری تمام راهنمایی پروژه را پذیرا گشته و در تهیه منابع ارزشمند از هیچ گونه مسـاعدت دریغ نفرمودند و در طول مدت تحقیق همواره یاور و پشتیبان حقیر بودند.

۲- جناب آقای دکتر امیر عبدالله‌زاده که در نقش استاد محترم مشـاور تذکـرات بسـیار ارزشـمند و ذیقیمتی را متذکر شده‌اند.

۳- مسئولین و کارشناسان محترم صنایع پدافند دریایی (صنعت شـهید فصیحـی و صنعـت شـهید رحیمی طاری) که نهایت همکاری را جهت انجام آزمایشها مبذول داشته‌اند.

مرکز اطلاعات علمی آزاد دانشگاه آزاد اسلامی ایران
تهران مرکزی

چکیده

فولادهای فوق مستحکم کم آلیاژ با درصد کربن متوسط (۰/۵- ۰/۲۵ درصد وزنی) و مقادیر متفاوت کرم، مولیبدن، نیکل، سیلیسیم و وانادیم جهت قطعات حساس در صنایع هوافضا، نیروگاههای اتمی و صنایع نظامی مورد نیاز می‌باشند. این نوع فولادها می‌توانند در استحکام‌های تسلیم بیشتر از ۱٤۰۰ MPa به طور موفقیت‌آمیزی بکار گرفته شوند، اما اغلب استفاده تجاری از آنها به علت چقرمگی شکست ضعیفشان محدود می‌شود. تأکید عمده جهت بهبود چقرمگی شکست این فولادها از طریق کنترل ریزساختار به روش عملیات حرارتی، عملیات ترمومکانیکی، اصلاح ناخالصیهای سولفیدی و طراحی آلیاژهای جدید انجام می‌گیرد.

در تحقیق حاضر جهت بهبود چقرمگی شکست این فولادها تأثیر فرآیندهای عملیات حرارتی دو مرحله‌ای (DT) (آستنیته و تمپر در دمای بالا و سپس آستنیته کردن ثانویه و تمپر معمولی)، و همچنین عملیات ترمومکانیکی در دمای بالا(HTMT) (نورد در ناحیه تکفازی آستنیت و بعد کوئنچ سریع و در نهایت عملیات تمپر) بر روی خواص مکانیکی بویژه چقرمگی ضربه یک فولاد فوق مستحکم کم آلیاژ محتوی نیکل و کرم مورد بررسی قرار گرفت. جهت مقایسه، عملیات حرارتی معمولی (CHT) نیز انجام شد.

متغیرهای فرآیند دمای آستنیته اولیه در هنگام نورد یا کوئنچ (C ° ۹۰۰،۱۰۵۰،۱۲۰۰) ، میزان کرنش در نورد (۰،٤۰،٦۰ درصد) انجام دادن یا ندادن تمپر و آستنیته مجدد (CHT،DT) و دمای تمپر (C ° ۰،۲۰۰،۳۰۰،٤۰۰،۵۰۰،٦۰۰) می‌باشند. پس از انجام عملیات حرارتی و نورد بررسیهای متالوگرافی و خواص مکانیکی انجام گرفت.

نتایج بدست آمده نشان دادند که نمونه‌های DT چقرمگی ضربه بهتری نسبت به نمونه‌های CHT دارند و همچنین اعمال فرآیند HTMT باعث بهبود خواص مکانیکی می‌شود. پدیده تردی در نمونه‌های DT آستنیته شده در دمای C ° ۹۰۰ و C ° ۱۰۵۰ و نمونه CHT آستنیته شده در دمای C ° ۹۰۰، با تمپر کردن در دمای C ° ۵۰۰ به صورت شکست کلیواژی آشکار شد که با شدت نسبتاً کمی همراه بود. اما در نمونه CHT آستنیته شده در دمای C ° ۱۰۵۰ پدیده تردی با تمپر کردن در دمای C ° ۵۰۰ به صورت شکست کاملاً بین‌دانه‌ای و با شدت زیادی مشاهده شد.

تغییر شکل و عملیات حرارتی – تردی مارتنزیت تمپر شده – فولاد فوق مستحکم – AISI٤۳۳۰

فهرست

صفحه

۱- مقدمه..... ۱

۲- مروری بر منابع..... ۳

۲-۱- معرفی فولادهای فوق مستحکم..... ۳

۲-۲- فولادهای فوق مستحکم کم آلیاژ با کربن متوسط..... ٤

۲-۳- پدیده تردی و انواع آن ٦

۲-۳-۱- تردی حرارتی (TE)..... ٦

۲-۳-۲- تردی مارتنزیت تمپر شده (TME)..... ۷

۲-٤- بهبود چقرمگی شکست..... ۱۱

۲-٤-۱- بهبود چقرمگی شکست به روش عملیات حرارتی..... ۱۲

۲-٤-۱-۱- عملیات دگرگونی هم دما در زمان کوتاه (STITT)..... ۱۳

۲-٤-۱-۲- عملیات حرارتی اصلاح شده (MHT)..... ۱۵

۲-٤-۱-۳- عملیات دو مرحله‌ای (DT)..... ۱۹

۲-٤-۲- بهبود چقرمگی شکست به روش عملیات ترمومکانیکی..... ۲۱

۲-٤-۲-۱- کوئنچ و تمپر پس از نورد کنترل شده(CRP-QT)..... ۲۲

۲-٤-۲-۲- عملیات ترمومکانیکی در دمای بالا (HTMT)..... ۲٤

۳-٤-۲- بهبود چقرمگی شکست از طریق اصلاح ناخالصیهای سولفیدی..... ۲۵

٤-٤-۲- بهبود چقرمگی شکست از طریق طراحی آلیاژهای جدید..... ۲۷

۵-۲- ارتباط چقرمگی شکست با انرژی ضربه..... ۲۷

۳- مواد اولیه و روش انجام آزمایشها..... ۳۰

۱-۳- مواد اولیه..... ۳۰

۲-۳- نحوه انجام فرآیندهای عملیات حرارتی و نورد و تجهیزات مربوطه..... ۳۳

۳-۳- آزمایشهای مکانیکی..... ۳۷

۱-۳-۳- آزمایش کشش..... ۳۷

۲-۳-۳- آزمایش ضربه شارپی..... ۳۷

۳-۳-۳- سختی سنجی ۳۷

٤-۳- متالوگرافی و شکست نگاری..... ۳۸

٤- نتایج..... ۳۹

۱-٤- خواص مکانیکی ۳۹

۱-۱-٤- آزمایش کشش..... ۳۹

۲-۱-٤- چقرمگی ضربه شارپی..... ٤۱

۳-۱-٤- آزمایش سختی سنجی..... ٤٦

۲-٤- متالوگرافی..... ٤۸

۱-۲-٤- ریزساختار نهایی ٤٨

۲-۲-٤- اندازه دانه آستنیت اولیه ٥۲

۳-٤- آنالیز سطوح شکست ٥٤

۱-۳-٤- تاثیر دمای آستنیته اولیه بر مورفولوژی سطح شکست ٥٥

۲-۳-٤- تاثیر فرآیندهایDT وCHT بر مورفولوژی سطح شکست ٥٦

۳-۳-٤- تاثیر دمای تمپر بر مورفولوژی سطح شکست ٥٨

٥- بحث ٦٥

۱-٥- تأثیر درجه حرارت آستنیته کردن اولیه بر خواص مکانیکی و ریزساختار ٦٥

۲-٥- تأثیر مقدار تغییر شکل بر خواص مکانیکی و ریزساختار ٦۷

۳-٥- تحلیلی بر تغییرات سختی ٦۸

٤-٥- اثر حافظه‌ای ریزساختار در فولادهای DT ۷۰

٥-٥- فاکتورهای ریزساختاری کنترل کننده خواص مکانیکی فولاد HTMT ۷۲

٦-٥- مکانیزم‌های پدیده TME ۷۳

٦- نتیجه‌گیری (پیشنهادات) ۷٥

۷- منابع و مراجع ۷۸

- واژه نامه ۸٥

فصل اول

۱- مقدمه

فولادهای فوق مستحکم کم آلیاژ با درصد کربن متوسط (۰/۵- ۰/۲۵ درصد وزنی) و مقادیر متفاوت کرم، مولیبدن، نیکل، سیلیسیم و وانادیم جهت قطعات حساس در صنایع هوافضا، نیروگاههای اتمی و صنایع نظامی مورد نیاز می‌باشند. بعضی از انواع این فولادها بیش از ۵۰ سال است که در کاربردهای اشاره شده استفاده می‌شوند. اگرچه نتایج بسیاری از تحقیقات محققین مختلف، در زمینه‌های ساخت و ایجاد خواص مورد نظر در این فولادها گزارش شده است، ولی نظر به توسعه روزافزون این فولادها، هنوز اطلاعات در زمینه آلیاژ سازی، عملیات ترمومکانیکی و عملیات حرارتی آنها کامل نمی‌باشد.

فولادهای فوق مستحکم کم آلیاژ می‌توانند در استحکام‌های تسلیم بیشتر از ۱۴۰۰ MPa به طور موفقیت‌آمیزی بکار گرفته شوند، اما اغلب استفاده تجاری از آنها به علت چقرمگی شکست ضعیفشان محدود می‌شود. به منظور بهبود چقرمگی این نوع فولادها تحقیقات گسترده‌ای انجام شده و روشهای مختلفی مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفته است. تأکید عمده جهت بهبود چقرمگی شکست این فولادها از طریق کنترل ریزساختار به روش عملیات حرارتی، عملیات ترمومکانیکی، اصلاح ناخالصیهای سولفیدی و طراحی آلیاژهای جدید انجام می‌گیرد.

در تحقیق حاضر تأثیر فرآیندهای عملیات حرارتی دو مرحله‌ای (DT) [1] (آستنیته و تمپر در دمای بالا و سپس آستنیته کردن ثانویه و تمپر معمولی)، و همچنین عملیات ترمومکانیکی در دمای بالا (HTMT) [2] (نورد در ناحیه تکفازی آستنیت و بعد کوئنچ سریع و در نهایت عملیات تمپر) بر روی خواص مکانیکی بویژه چقرمگی ضربه یک فولاد فوق مستحکم کم آلیاژ محتوی نیکل و کرم مورد بررسی قرار می گیرد.

---

[1] - Duplex Treatment

[2] - High Temperature Thermomechanical Treatment

فصل دوم این پژوهش به معرفی فولادهای فوق مستحکم بخصوص فولادهای فوق مستحکم کم آلیاژ اختصاص یافته است و روشهای بهبود چقرمگی شکست این نوع فولادها را نیز شرح می‌دهد همچنین در این فصل پدیده تردی مارتنزیت تمپر شده مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

در فصل سوم روش تحقیق و نحوه انجام آزمایشها ارائه شده‌اند. این فصل به دو بخش تهیه مواد آزمایش شامل نمونه‌سازی، آنیل کامل، نورد و عملیات حرارتی، و بخش انجام آزمایشهای متالوگرافی، سختی‌سنجی، کشش، ضربه، شکست‌نگاری و تعیین اندازه دانه آستنیت اولیه پرداخته است.

فصل چهارم به ارائه نتایج حاصل از آزمایشها اختصاص دارد و در فصل پنجم تجزیه و تحلیل نتایج مورد بحث و بررسی قرار می گیرند.

فصل ششم نتیجه‌گیری کلی از انجام تحقیق را بطور خلاصه ارائه نموده است و در فصل هفتم منابع و مراجع مورد استفاده در این تحقیق ارائه شده‌اند.

فصل دوم

۲- مروری بر منابع

۲-۱- معرفی فولادهای فوق مستحکم

فولادها گروهی از آلیاژهای آهن با کربن و عناصر دیگرند که معمولاً کمتر از یک درصد کربن داشته و طیف وسیعی از سطوح متوسط استحکامی (۳۰۰-۲۰۰ MPa) با چقرمگی عالی تا استحکامهای بسیار بالا (۲۰۰۰ MPa) و چقرمگی کافی را در بر می‌گیرند. کاربرد وسیع فولادها ناشی از خواص متنوع آنها است که به کمک فرآیندهای مختلف ترمومکانیکی، عملیات حرارتی و تغییر ترکیب شیمیایی امکان‌پذیر می‌شود.

دامنه وسیع خواص متنوع فولادها ناشی از نوع، اندازه و توزیع فازهای متفاوت می‌باشد. در این میان فولادهای فوق مستحکم جایگاه ویژه‌ای در مصارف سازه‌ای دارند. آن دسته از فولادهای سازه‌ای که دارای استحکام بسیار بالایی می‌باشند، تحت عنوان فولادهای فوق مستحکم(UHSS)[1] نامیده می‌شوند. در این نوع فولادها استحکام تسلیمی تا حدود ۱۴۰۰ MPa دیده شده است، اعضاء خانواده این فولادها را می‌توان به شکل زیر تفکیک نمود [۳-۱]:

الف- فولادهای کم آلیاژی با کربن متوسط (۴۳۴۰ ، ۴۳۳۰ ، ۴۱۳۰ AISI)

ب- فولادهای آلیاژ متوسط سختی‌پذیر در هوا (H13، H11)

ج- فولادهای پرآلیاژی سختی‌پذیر (فولادهای ماریجینگ)

د- فولادهای زنگ نزن سختی‌پذیر (AFC۷۷، ۱۷-۴ PH)

ذ- فولادهای آستنیتی نورد سرد شده (۳۰۱، ۲۰۲ AISI)

---

[1]- Ultra High Strength Steels

۲-۲- فولادهای فوق مستحکم کم آلیاژ با کربن متوسط

اولین خانواده فولادهای فوق مستحکم، فولادهای کم آلیاژ با کربن متوسط می‌باشند. فولادهای کم آلیاژ تجاری در شرایط کوئنچ و تمپر شده جهت بسیاری از اجزاء مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرند. فولادهای کم آلیاژ کوئنچ و کم تمپر شده با مقادیر متوسط کربن (۰/۵۰-۰/۲۵ درصد وزنی) و مقادیر متفاوت کرم، مولیبدن، نیکل، سیلیسیم و وانادیم جهت قطعات حساس در صنایع هوافضا، نیروگاههای اتمی و صنایع نظامی مورد نیاز می‌باشند. این فولادهای کم آلیاژ می‌توانند در استحکام‌های بیشتر از ۱٤۰۰ MPa به خوبی بکار گرفته شوند. جدول (۱-۲) تعدادی از مهمترین فولادهای فوق مستحکم کم آلیاژ را نشان می‌دهد [۳-۱].

جدول ۱-۲- ترکیب شیمیایی برخی از فولادهای فوق مستحکم کم آلیاژ (درصد وزنی)

Steel	C	Si	Mn	P,S	Cr	Mo	Ni	V
4340	0·38-0·43	0·20-0·35	0·60-0·90	0·010*	0·70-0·90	0·20-0·30	1·65-2·00	...
300M	0·40-0·45	1·45-1·80	0·60-0·90	0·010*	0·70-0·95	0·30-0·50	1·65-2·00	0·05-0·10
D6AC	0·42-0·48	0·15-0·30	0·60-0·90	0·015*	0·90-1·20	0·90-1·10	0·40-0·70	0·07-0·15
4330Si	0·27-0·33	0·40-0·70	0·60-0·80	0·015*	1·00-1·35	0·35-0·55	1·85-2·25	...
4330V	0·28-0·33	0·15-0·35	0·65-1·00	0·015*	0·75-1·00	0·35-0·50	1·65-2·00	0·05-0·10
HY-TUF	0·23-0·28	1·39-1·70	1·20-1·50	0·015*	0·70-0·40	0·35-0·45	1·65-2·00	...

* Maximum value.

فولادهای فوق مستحکم کم آلیاژ جهت جوابگو بودن نیاز استحکام و چکشخواری بالا و همچنین حجم و وزن کم طی ۵۰ سال گذشته مورد استفاده قرار گرفته‌اند. برای مثال، در هواپیماهاییکه با ناو حمل می‌شوند چرخها از خواص بی‌نظیری برخوردار می‌باشند، چرا که باید خواص ناسازگار و مجزا از هم زیر را تحمل کنند: قطعه اصلی چرخ هواپیما باید در برابر بارهای ضربه‌ای ناشی از سرعتهای فرود آمدن بیش از ۱۲/۸٦ m/s مقاوم باشد، همچنین چرخ انتهایی هواپیما باید نیرویی را که در هنگام بلند شدن از عرشه کشتی به آن اعمال می‌شود تحمل کند، اما هنگامیکه هواپیما در حال پرواز است، چرخ هواپیما به عنوان وزن اضافی مزاحم می‌باشد. بنابراین، وزن و همچنین حجم چرخ هواپیما که هنگام جمع شدن اشغال می‌شود باید حداقل باشند [٤].

از جمله اعضاء فولادهای فوق مستحکم کم آلیاژ می‌توان به فولادهای ٤١٣٠، ٤٣٤٠، ٣٠٠M و D-٦a اشاره نمود. اولین عضو این گروه فولاد ٤١٣٠ می‌باشد که از جمله کاربرد آن در اجزاء ماشینها به صورت سختی سطحی شده با فرآیند نیتروژن دهی، اجزاء پمپها، خطوط هیدرولیک، فلانچها و چرخدنده‌ها می‌باشد. فولاد ٤٣٤٠ مثال معروفی از فولادهای فوق مستحکم کم آلیاژ می‌باشد که از سال ١٩٥٠ استفاده از آن گسترش یافت و از سال ١٩٥٥ جهت کاربردهای هوافضا بکار گرفته شد. غالباً این فولاد به صورت معمولی آستنیته شده و در روغن کوئنچ می‌شود و سپس در دمای ٢٠٠ °C یا نزدیک به آن تمپر می‌شود، که استحکام آن در نهایت به MPa ١٧٩٠-١٩٣٠ می‌رسد. در دهه ١٩٦٠ فولاد ٣٠٠M به عنوان فولادی با استحکام بیشتر از فولاد ٤٣٤٠ معرفی شد. این فولاد مقدار کربن و سیلیسیم بیشتری نسبت به فولاد ٤٣٤٠ دارد و استحکام تسلیم آن به MPa ١٨٦٠-٢٠٧٩ می‌رسد. از سال ١٩٦٦، فولاد D-٦a به طور گسترده در اجزاء حساس صنایع هوافضا بکار گرفته می‌شود. فولاد D-٦a حاوی وانادیم بوده و نسبت به فولاد ٤٣٤٠ کرم و مولیبدن بیشتری دارد، که درنتیجه آن ریزدانگی و چقرمگی بهتری دارد. هم اکنون فولادهایی با حساسیت بالاتر نظیر ٤٣٤٠ Si (اصلاح شده با سیلیسیم)، ٤٣٣٠VM و HY -TUF جهت کاربردهای هوافضا با استحکام ١٥٢٠-١٦٥٠MPa به کار گرفته می‌شوند.

به طور کلی فولادهای این خانواده خواص مکانیکی و چقرمگی مناسب خود را از طریق کوئنچ و تمپر که منجر به ساختار نهایی مارتنزیت تمپر شده می‌گردد، بدست می‌آورند. این گروه از فولادها قابلیت آهنگری گرم در محدوده حرارتی ١٠٦٠-١٢٣٠ °C را دارا می‌باشند. قبل از ماشینکاری باید نمونه‌ها را در محدوده حرارتی ٨٧٠-٩٢٥ °C نرماله نمود و سپس در محدوده دمایی ٦٥٠-٦٧٥ °C تمپر کرد. این فولادها را می‌توان در حالت آنیل برید، پرسکاری کرد و یا بر روی آنها تغییر شکل سرد اعمال نمود. ترجیحاً آنها را در حالت آنیل کامل یا نرماله جوشکاری می‌کنند و در موقع جوشکاری جهت جلوگیری از ایجاد ترک ، قطعه را پیش‌گرم کرده و در طول جوشکاری گرم نگه می‌دارند [٥].