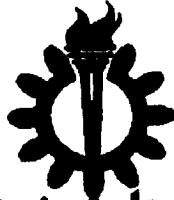
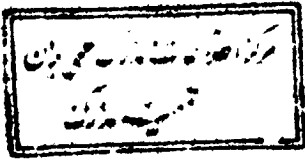


جسم الله الرحمن الرحيم

٤٧٥٢٧



دانشگاه علم و صنعت ایران

دانشکده مهندسی مواد و متالورژی

بهینه‌سازی شرایط جوشکاری و عملیات حرارتی فولاد AISI ۴۱۳۰

علیرضا زمانی

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی

مواد - شناسایی و انتخاب مواد فلزی

شماره ۳۸۷۲

استاد راهنما: دکتر فیراندیش - دکتر تقی‌ئی

زمستان ۱۳۷۷

۲۷۵۲۷

چکیده

تأثیر متغیرهای جوشکاری و عملیات حرارتی بر ریزساختار و خواص مکانیکی فولاد AISI ۴۱۳۰ از خانواده فولادهای کم‌آلیاژ عملیات حرارتی‌پذیر مورد بررسی قرار گرفت. عملیات پیش‌گرم کردن بر روی تمامی نمونه‌ها انجام شد و نمونه‌ها در حالت آنیل شده با روش GTAW و با استفاده از دو نوع سیم جوش ER80SG و ER100S-6 جوشکاری شدند. در بررسی تأثیر پارامترهای متغیر جوشکاری بر ابعاد گرده جوش و ناحیه HAZ، مشخص گردید که پارامترهای جوشکاری مورد استفاده در نمونه شماره W۳ مناسبترین آنها می‌باشند. همچنین در بررسی تأثیر پارامترهای جوشکاری بر سختی مناطق جوش و HAZ مشخص شد که سختی این مناطق با پارامترهای کنترل‌کننده حرارت ورودی یعنی شدت جریان، ولتاژ و سرعت جوشکاری قابل تغییر است. نتایج نشان داد که با افزایش حرارت ورودی، سختی مناطق جوش و HAZ کاهش می‌یابد. در بررسی تأثیر نوع سیم جوش مصرفی بر خواص مکانیکی مشخص شد که نمونه‌های جوشکاری شده با سیم جوش ER100S-6 خواص استحکامی بالاتر و انعطاف‌پذیری پائین‌تری نسبت به نمونه‌های جوشکاری شده با سیم جوش ER80SG دارند. همچنین تأثیر عملیات حرارتی پس‌گرم بر ریزساختار و خواص مکانیکی نمونه‌های جوشکاری شده بررسی شد. ایجاد یک ریزساختار مارتنزیتی ظریف و یکنواخت در مناطق مختلف نمونه‌های جوشکاری شده و حذف آستنیت باقیمانده تأثیر مهم عملیات حرارتی پس‌گرم بر ریزساختار می‌باشد. نتایج حاصله نشان می‌دهد که انجام عملیات کوئنچ و تمپر پس از جوشکاری باعث افزایش استحکام و سختی نمونه‌ها و همچنین یکنواخت‌تر شدن سختی در مناطق مختلف می‌شود. انجام عملیات نرمال کردن قبل از عملیات حرارتی کوئنچ و تمپر باعث می‌شود که با حفظ استحکام بالا، چقرمگی نمونه‌های جوشکاری شده افزایش یابد.

فصل اول

۱ مقدمه

فصل دوم : مروری بر مطالب

۳	تاریخچه	-۱-۲
۴	فولادهای کم آلیاژ	-۲-۲
۵	فولادهای کم آلیاژ عملیات حرارتی پذیر	-۳-۲
۶	فولاد AISI ۴۱۳۰	-۴-۲
۷	خواص فیزیکی	-۱-۴-۲
۸	عناصر آلیاژی و ناخالصیها	-۲-۴-۲
۱۳	خواص مکانیکی	-۳-۴-۲
۱۴	عملیات حرارتی	-۴-۴-۲
۱۷	جوشکاری فولاد AISI ۴۱۳۰	-۵-۲
۲۱	ناحیه فلز جوش	-۶-۲
۲۱	مشخصه‌های انجمادی جوش	-۱-۶-۲
۲۲	تغییر حالتها در فلز جوش فولادهای کم آلیاژی	-۲-۶-۲
۲۵	اثر عناصر آلیاژی بر کینتیک تغییر حالت	-۳-۶-۲
۲۹	چقرمگی فلز جوش	-۴-۶-۲
۲۹	ابعاد گرده جوش	-۵-۶-۲
۲۹	ناحیه متأثر از حرارت (HAZ)	-۷-۲
۳۰	تغییر حالت‌های حین گرمایش	-۱-۷-۲
۳۳	رشد دانه و نحوه کنترل آن	-۲-۷-۲
۳۵	تغییر حالت‌های حین سرمایش	-۳-۷-۲
۳۸	چقرمگی ناحیه HAZ	-۴-۷-۲
۳۹	فرآیند جوشکاری GTAW	-۸-۲
۴۰	متغیرهای روش جوشکاری GTAW	-۱-۸-۲
۴۲	محدودیت‌های روش جوشکاری GTAW	-۲-۸-۲
۴۲	انتخاب سیم جوش	-۹-۲
۴۳	عوامل موثر بر جوش پذیری فولاد AISI ۴۱۳۰	-۱۰-۲

۴۴	نوع فرآیند جوشکاری	۱-۱۰-۲
۴۴	ترکیب شیمیایی	۲-۱۰-۲
۴۵	گرمای ورودی	۳-۱۰-۲
۴۵	دمای پیشگرم ، بین پاسی و پسگرم	۴-۱۰-۲
۴۷	شکل هندسی اتصال و مقدار ممانعت	۵-۱۰-۲
۴۸	عملیات حرارتی جوش	۱۱-۲
۵۰	عیوب بالقوه در جوشکاری فولاد AISI ۴۱۳۰	۱۲-۲
۵۰	ترک گرم	۱-۱۲-۲
۵۳	ترک سرد (ترک ناشی از هیدروژن)	۲-۱۲-۲

فصل سوم : روش آزمایش

۵۵	ورق فولاد AISI ۴۱۳۰	۱-۳
۵۵	سیم جوش	۲-۳
۵۷	انتخاب روش جوشکاری و متغیرهای آن	۳-۳
۵۷	تهیه و آماده سازی نمونه ها برای جوشکاری	۴-۳
۵۸	جوشکاری نمونه ها	۵-۳
۵۹	عملیات پیشگرم	۱-۵-۳
۶۰	عملیات جوشکاری	۲-۵-۳
۶۰	متغیرهای جوشکاری	۳-۵-۳
۶۲	عملیات پسگرم	۴-۵-۳
۶۲	بررسی اندازه دانه آستنیت	۵-۵-۳
۶۲	عملیات حرارتی نرماله کردن	۶-۵-۳
۶۲	عملیات حرارتی کوئنچ و تمپر	۷-۵-۳
۶۳	آزمون غیر مخرب	۶-۳
۶۴	مقطع زدن نمونه های جوشکاری شده	۷-۳
۶۴	تهیه نمونه های آزمایش	۸-۳
۶۴	آزمایش متالوگرافی	۱-۸-۳
۶۵	آزمایش کشش	۲-۸-۳
۶۶	آزمایش سختی سنجی	۳-۸-۳

فصل چهارم: نتایج آزمایشات

۶۷	نتایج بررسی ورق فولاد AISI ۴۱۳۰	-۱-۴
۶۸	نتایج اندازه‌گیری ابعاد گرده جوش	-۲-۴
۷۲	نتایج بررسی ریزساختار	-۳-۴
۸۰	نتایج آزمایش کشش	-۴-۴
۸۵	نتایج آزمایش سختی سنجی	-۵-۴
۸۸	نتایج آزمون غیر مخرب	-۶-۴

فصل پنجم: بحث

۹۱	ریزساختار و خواص ورق فولادی AISI ۴۱۳۰ مورد استفاده	-۱-۵
۹۲	تأثیر تغییر پارامترهای جوشکاری بر ابعاد گرده جوش و ناحیه HAZ	-۲-۵
۹۲	تأثیر تغییر شدت جریان جوشکاری بر ابعاد گرده جوش و ناحیه HAZ	-۱-۲-۵
۹۳	تأثیر تغییر ولتاژ جوشکاری بر ابعاد گرده جوش و ناحیه HAZ	-۲-۲-۵
۹۴	تأثیر تغییر سرعت جوشکاری بر ابعاد گرده جوش و ناحیه HAZ	-۳-۲-۵
۹۵	تأثیر تغییر زاویه پخ لبه های جوشکاری بر ابعاد گرده جوش و ناحیه HAZ	-۴-۲-۵
۹۶	تأثیر تغییر سرعت تزریق سیم جوش بر ابعاد گرده جوش و ناحیه HAZ	-۵-۲-۵
۹۷	تأثیر عملیات حرارتی پسگرم بر ریزساختار مناطق جوش، HAZ و فلز پایه	-۳-۵
۹۹	تأثیر تغییر پارامترهای جوشکاری بر سختی مناطق جوش و HAZ	-۴-۵
۱۰۲	تأثیر نوع سیم جوش مصرفی بر خواص مکانیکی نمونه‌های جوشکاری شده	-۵-۵
۱۰۴	تأثیر عملیات حرارتی پسگرم بر خواص مکانیکی نمونه‌های جوشکاری شده	-۶-۵
۱۰۴	تأثیر عملیات حرارتی پسگرم بر استحکام نمونه‌های جوشکاری شده	-۱-۶-۵
۱۰۵	تأثیر عملیات حرارتی پسگرم بر کرنش شکست نمونه‌های جوشکاری شده	-۲-۶-۵
۱۰۶	تأثیر عملیات حرارتی پسگرم بر سختی نمونه‌های جوشکاری شده	-۳-۶-۵

نتیجه‌گیری

۱۰۸

مراجع

۱۱۰

فهرست جداول

صفحه

عنوان

- جدول ۱-۲ : ترکیب شیمیایی فولاد AISI ۴۱۳۰ ۶
- جدول ۲-۲ : خواص مکانیکی فولاد AISI ۴۱۳۰ تحت شرایط مختلف کوئنچ و تمپر ۱۴
- جدول ۳-۲ : دمای پیش گرم و بین پاسی توصیه شده برای فولادهای کم آلیاژ عملیات حرارتی پذیر ۴۷
- جدول ۴-۲ : خواص مکانیکی اتصالات جوشکاری شده از نوع عرضی در فولادهای HTLA پس از عملیات کوئنچ و تمپر ۴۹
- جدول ۱-۳ : ترکیب شیمیایی سیم جوش AWS ER80S-G ۵۵
- جدول ۲-۳ : ترکیب شیمیایی سیم جوش AWS ER100S-6 ۵۷
- جدول ۳-۳ : متغیرهای مورد استفاده در جوشکاری نمونه‌ها ۶۰
- جدول ۴-۳ : کدبندی نمونه‌های جوشکاری شده با پارامترهای مختلف جوشکاری ۶۱
- جدول ۵-۳ : کدبندی نمونه‌های جوشکاری و عملیات حرارتی شده ۶۳
- جدول ۱-۴ : ترکیب شیمیایی ورق فولادی AISI ۴۱۳۰ بدست آمده بوسیله اسپکتروفتومتری ۶۷
- جدول ۲-۴ : نتایج اندازه‌گیری ابعاد گرده جوش نمونه‌های جوشکاری شده بر طبق کدبندی جدول ۴-۳ ۶۹
- جدول ۳-۴ : نتایج حاصل از آزمایش کشش نمونه‌های جوشکاری و عملیات حرارتی شده با شرایط ذکر شده در جدول ۵-۳ ۸۰
- جدول ۴-۴ : نتایج سختی سنجی مناطق جوش و HAZ نمونه‌های جوشکاری شده با پارامترهای مختلف جوشکاری و کدبندی موجود در جدول ۴-۳ ۸۶

فهرست اشکال

عنوان

صفحه

- شکل ۱-۲: مخزن تحت فشار از جنس فولاد AISI ۴۱۳۰ ۴
- شکل ۲-۲: دیاگرام تغییر فاز همدمای فولاد AISI ۴۱۳۰ ۷
- شکل ۳-۲: دیاگرام تغییر فاز غیر همدمای فولاد AISI ۴۱۳۰ ۹
- شکل ۴-۲: ریزساختارهای فولاد AISI ۴۱۳۰ ۱۸
- شکل ۵-۲: نواحی مختلف قطعه جوشکاری شده و دیاگرام گرم و سرد شدن آنها ۲۲
- شکل ۶-۲: (a): دیاگرام شبه تعادلی سیستم Fe-Fe₃C، (b): منحنی های کربن فصل مشترک γ/α در سرعت های سرد شدن متفاوت ۲۴
- شکل ۷-۲: نمونه هایی از ساختارهای دیده شده در فلز جوش با سرعت های سرد شدن متفاوت ۲۶
- شکل ۸-۲: منحنی CCT فولاد کربن - منگنز دار با ۰/۱۹ و ۰/۲۸ درصد وزنی کربن ۲۷
- شکل ۹-۲: شکل شماتیک اثرات اندازه دانه، عناصر آلیاژی و متغیرهای جوشکاری بر دیاگرام CCT فلز جوش ۲۸
- شکل ۱۰-۲: شکل شماتیک گرده جوش و مشخصه های ابعادی آن ۳۰
- شکل ۱۱-۲: مناطق مختلف HAZ جوش تک پاس فولاد کم کربن ۳۱
- شکل ۱۲-۲: ارتباط بین دمای تبلور مجدد، میزان تغییر فرم و اندازه دانه اولیه ۳۲
- شکل ۱۳-۲: تصاویر میکروسکوپ نوری از مناطق مختلف HAZ یک فولاد پرلیتی نرماله شده ۳۶
- شکل ۱۴-۲: تجهیزات روش جوشکاری GTAW ۴۰
- شکل ۱۵-۲: تاثیر دمای تمپر بر خواص مکانیکی فلز جوش فولادهای AISI ۴۳۴۰، AISI ۴۱۴۰ و AISI ۴۱۳۰ ۴۹
- شکل ۱۶-۲: رابطه بین درصد کربن، فسفر و گوگرد با ترک گرم در فولادهای HTLA ۵۱
- شکل ۱-۳: نمودار کارها و آزمایشات انجام گرفته ۵۶
- شکل ۲-۳: شکل شماتیک نمونه های مورد استفاده برای جوشکاری ۵۷
- شکل ۳-۳: طرح اتصال مورد استفاده در جوشکاری نمونه ها ۵۸
- شکل ۴-۳: نمودار شماتیک کل فرآیند جوشکاری نمونه ها ۵۹
- شکل ۵-۳: مقطع برش نمونه های جوشکاری شده ۶۴
- شکل ۶-۳: پارامترهای اندازه گیری شده در گرده جوش و ناحیه HAZ ۶۵
- شکل ۷-۳: نمونه آزمایش کشش عمود بر خط جوش ۶۶
- شکل ۱-۴: نمودار تغییرات ابعاد گرده جوش بر حسب تغییر شدت جریان جوشکاری ۷۰

- شکل ۲-۴ : نمودار تغییرات ابعاد گرده جوش بر حسب تغییر ولتاژ جوشکاری ۷۰
- شکل ۳-۴ : نمودار تغییرات ابعاد گرده جوش بر حسب تغییر سرعت جوشکاری ۷۱
- شکل ۴-۴ : نمودار تغییرات ابعاد گرده جوش بر حسب تغییر زاویه پخ لبه ها ۷۱
- شکل ۵-۴ : نمودار تغییرات ابعاد گرده جوش بر حسب تغییر سرعت تزریق سیم جوش ۷۲
- شکل ۶-۴ : ریزساختار ورق فولادی AISI ۴۱۳۰ نرماله شده ۷۳
- شکل ۷-۴ : تصویر SEM ورق فولادی AISI ۴۱۳۰ نرماله شده ۷۳
- شکل ۸-۴ : تصویر مناطق جوش ، HAZ و فلز پایه در نمونه جوشکاری شده شماره W۳ ۷۴
- شکل ۹-۴ : تصویر مناطق جوش ، HAZ در نمونه جوشکاری شده شماره W۳ ۷۵
- شکل ۱۰-۴ : تصویر مناطق HAZ و فلز پایه در نمونه جوشکاری شده شماره W۳ ۷۵
- شکل ۱۱-۴ : تصویر منطقه جوش در نمونه جوشکاری شده شماره W۳ ۷۶
- شکل ۱۲-۴ : تصویر SEM منطقه جوش در نمونه جوشکاری شده شماره W۳ ۷۶
- شکل ۱۳-۴ : تصویر منطقه HAZ در نمونه جوشکاری شده شماره W۳ ۷۷
- شکل ۱۴-۴ : تصویر SEM منطقه HAZ در نمونه جوشکاری شده شماره W۳ ۷۷
- شکل ۱۵-۴ : تصویر SEM منطقه جوش در نمونه جوشکاری و عملیات حرارتی شده شماره ۲-WT۳ ۷۸
- شکل ۱۶-۴ : تصویر SEM منطقه جوش در نمونه جوشکاری و عملیات حرارتی شده شماره ۲-WT۳ ۷۸
- شکل ۱۷-۴ : تصویر SEM منطقه HAZ در نمونه جوشکاری و عملیات حرارتی شده شماره ۲-WT۳ ۷۹
- شکل ۱۸-۴ : تصویر SEM منطقه فلز پایه در نمونه جوشکاری و عملیات حرارتی شده شماره ۲-WT۳ ۷۹
- شکل ۱۹-۴ : تأثیر دمای بازگشت بر استحکام کششی نمونه های جوشکاری و عملیات حرارتی شده با سیم جوش ER80SG و شرایط مندرج در جدول ۳-۵ ۸۲
- شکل ۲۰-۴ : تأثیر دمای بازگشت بر استحکام کششی نمونه های جوشکاری و عملیات حرارتی شده با سیم جوش ER100S-6 و شرایط مندرج در جدول ۳-۵ ۸۲
- شکل ۲۱-۴ : تأثیر دمای بازگشت بر استحکام تسلیم نمونه های جوشکاری و عملیات حرارتی شده با سیم جوش ER80SG و شرایط مندرج در جدول ۳-۵ ۸۳
- شکل ۲۲-۴ : تأثیر دمای بازگشت بر استحکام تسلیم نمونه های جوشکاری و عملیات حرارتی شده با سیم جوش ER100S-6 و شرایط مندرج در جدول ۳-۵ ۸۳

- شکل ۴-۲۳: تأثیر دمای بازگشت بر انعطاف پذیری نمونه‌های جوشکاری و عملیات
 حرارتی شده با سیم جوش ER80SG و شرایط مندرج در جدول ۳-۵ ۸۴
- شکل ۴-۲۴: تأثیر دمای بازگشت بر انعطاف پذیری نمونه‌های جوشکاری و عملیات
 حرارتی شده با سیم جوش ER100S-6 و شرایط مندرج در جدول ۳-۵ ۸۴
- شکل ۴-۲۵: نمودار تغییرات سختی مناطق جوش و HAZ نمونه‌های جوشکاری شده بر
 حسب تغییر شدت جریان جوشکاری با ثابت بودن ولتاژ و سرعت جوشکاری ۸۷
- شکل ۴-۲۶: نمودار تغییرات سختی مناطق جوش و HAZ نمونه‌های جوشکاری شده بر
 حسب تغییر ولتاژ جوشکاری با ثابت بودن شدت جریان و سرعت جوشکاری ۸۷
- شکل ۴-۲۷: نمودار تغییرات سختی مناطق جوش و HAZ نمونه‌های جوشکاری شده بر
 حسب تغییر سرعت جوشکاری با ثابت بودن شدت جریان و ولتاژ جوشکاری ۸۸
- شکل ۴-۲۸: نمودار تغییرات سختی بر حسب فاصله از خط جوش در نمونه‌های جوشکاری
 شده با سیم جوش ER80SG و عملیات حرارتی شده با شرایط مندرج در
 جدول ۳-۵ ۸۹
- شکل ۴-۲۹: نمودار تغییرات سختی بر حسب فاصله از خط جوش در نمونه‌های جوشکاری
 شده با سیم جوش ER100S-6 و عملیات حرارتی شده با شرایط مندرج در
 جدول ۳-۵ ۸۹
- شکل ۴-۳۰: نمودار تغییرات سختی مناطق جوش و HAZ و فلز پایه نمونه‌های جوشکاری
 شده با سیم جوش ER80SG و عملیات حرارتی شده بر حسب دمای تمپر ۹۰
- شکل ۴-۳۱: نمودار تغییرات سختی مناطق جوش و HAZ و فلز پایه نمونه‌های جوشکاری
 شده با سیم جوش ER100S-6 و عملیات حرارتی شده بر حسب دمای تمپر ۹۰

فصل اول

مقدمه

با توجه به توسعه کاربرد فلزات با استحکام متوسط و عملیات حرارتی پذیر برای تهیه سازه‌های حساس در صنایع دفاعی و صنایع هوا-فضا، فولاد AISI ۴۱۳۰ جایگاه ویژه‌ای پیدا کرده است. این فولاد که در دسته فولادهای کم آلیاژ عملیات حرارتی پذیر قرار دارد، با انجام رژیم‌های مختلف عملیات حرارتی می‌تواند به استحکام کششی تا حدود ۱۴۰۰ MPa برسد.

استفاده از این فولاد در ساخت مخازن تحت فشار بخصوص برای مخازنی که در دمای بالا بکار برده میشوند از نیمه دوم قرن بیستم متداول گشته است. فولاد AISI ۴۱۳۰ بدلیل دارا بودن میزان کربن بیشتر نسبت به فولادهای ساده کربنی و همچنین داشتن عناصر آلیاژی نظیر کروم و مولیبدن، دارای فرآیند جوش پذیری پیچیده‌ای می‌باشد و جوشکاری آن نیازمند شرایط کنترل شده همراه با رژیم‌های پیش‌گرم و پس‌گرم کردن خاص می‌باشد. کنترل میزان فسفر و گوگرد در ترکیب شیمیائی فلز جوش نیز از اهمیت خاصی برخوردار است زیرا بر اساس تحقیقات بعمل آمده، گوگرد حساسیت در برابر ترک گرم و فسفر حساسیت در برابر ترک سرد را می‌افزایند. این فولاد توسط اغلب فرآیندهای جوشکاری از قبیل الکتروود دستی، قوس الکتریکی

تحت پوشش گاز محافظ ، اشعه الکترونی ، مقاومتی و پرتولیزی قابل جوشکاری می باشد. یکی از روشهای مناسب برای جوشکاری این فولاد ، روش جوشکاری قوس - الکتروود تنگستنی تحت پوشش گاز محافظ (GTAW) می باشد. در این روش جوشکاری ، انتخاب صحیح پارامترهای جوشکاری ، انتخاب سیم جوش مناسب و استفاده از عملیات پیش گرم و پس گرم مناسب و در صورت امکان ، مکانیزه کردن روش جوشکاری از اهمیت خاصی برخوردار می باشد.

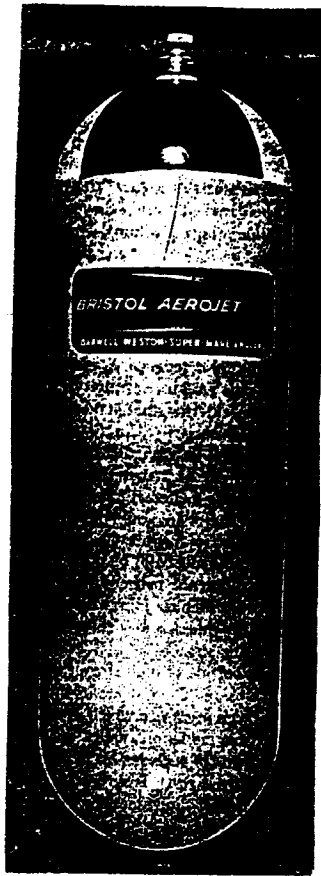
فصل دوم

مروری بر مطالب

۲-۱- تاریخچه

با معرفی فولادهای با استحکام بالا در دهه ۱۹۵۰، اولین مخازن نگهداری گاز تحت فشار بالا در کشور انگلستان ساخته شد. در ابتدا برای ساخت این مخازن از فولاد آلیاژی با ۰/۲۵ درصد کربن و ۱/۵ درصد منگنز که قابلیت پذیرش عملیات حرارتی را داشته و استحکام تسلیم آن پس از انجام عملیات حرارتی به 850 MPa می‌رسد، استفاده می‌شد. انجام تحقیقات گسترده‌ای در دهه ۱۹۶۰ بر روی فولادهای با استحکام بالا، سبب جایگزینی فولاد AISI ۴۱۳۰ با حدود ۱ درصد کروم و ۰/۲ درصد مولیبدن بجای فولاد فوق‌الذکر گردید. شکل ۱-۲ نشانگر یک مخزن تحت فشار است که از آلیاژ AISI ۴۱۳۰ ساخته شده و استحکام آن پس از انجام عملیات حرارتی به 1240 MPa رسیده است. قسمت سیلندر شکل این مخزن از لوله ساخته شده که قسمت کلاهک‌ها پس از عملیات شکل دهی ورق به لوله جوش داده شده‌اند

[۱].



شکل ۱-۲: مخزن تحت فشار از جنس فولاد AISI ۴۱۳۰ [۱].

۲-۲- فولادهای کم آلیاژ

فولادهای کم آلیاژ دارای مقدار کمی عناصر آلیاژی هستند و بر حسب استحکام، نوع عملیات حرارتی

انجام شده بر روی آنها یا موارد مصرف و کاربرد به چهار گروه تقسیم می‌شوند [۲، ۲۳]:

گروه ۱: فولادهای کم آلیاژی با استحکام بالا (HSLA): با نقطه تسلیم $410-480 \text{ Mpa}$ که به صورت نورد

شده یا نرماله شده عرضه می‌شوند و مانند فولادهای ساختمانی جوشکاری می‌شوند.

گروه ۲: فولادهای کم آلیاژ استحکام بالای کوئنچ و تمپر شده (Q,T): با نقطه تسلیم $480-830 \text{ Mpa}$ و با

چقرمگی بسیار خوب حتی در دماهای پائین و زیر صفر. معمولاً پس از جوشکاری، عملیات حرارتی بر روی آنها انجام نمی‌گیرد و ندرتاً آنها را تحت عملیات تنش زدایی قرار می‌دهند.

گروه ۳: فولادهای کم آلیاژ عملیات حرارتی پذیر (HTLA): پس از جوشکاری، نیاز به عملیات حرارتی کوئنچ و تمپر دارند. چقرمگی آنها بخوبی گروه ۲ نیست ولی استحکام بالاتری دارند.

گروه ۴: فولادهای کم آلیاژ کروم-مولیبدن دار: کاربرد مهم آنها در صنعت نفت و نیروگاههای برق با درجه حرارت کار بالا حدود 700°C می‌باشد.

۲-۳- فولادهای کم آلیاژ عملیات حرارتی پذیر

این گروه فولادها دارای ۰/۲۵ درصد الی ۰/۴۵ درصد کربن بوده و دیگر اجزاء آلیاژی آنها شامل: نیکل، کروم، مولیبدن و وانادیم می‌باشد که برای بدست آوردن مقاومت به ضربه بالاتر در دمای پائین یا عمق سختی بیشتر به هنگام عملیات حرارتی اضافه می‌شوند. حد قابل قبول فسفر و گوگرد برای این فولادها حداکثر ۰/۰۴ درصد است. مطالعات جدید نشان می‌دهد که فسفر و گوگرد حساسیت به ترکیدگی گرم جوش را افزایش می‌دهند و بهمین علت در سازه‌های جوشکاری با استحکام بالا، بایستی تا حد امکان، آنها را کاهش داد. برای سازه‌هایی که پس از جوشکاری، عملیات حرارتی جهت حصول استحکام کششی 1400 Mpa را لازم دارند، باید مجموع این دو عنصر کمتر از ۰/۱۵ درصد وزنی باشد [۲، ۳، ۴]. از اعضای این گروه می‌توان به فولاد $AISI\ 4130$ و پس از آن فولاد مستحکم تر $AISI\ 4140$ و سپس فولاد بسیار مستحکم با قابلیت سختی پذیری بیشتر $AISI\ 4340$ اشاره کرد [۲].

در طی سالهای اخیر تغییرات اساسی و پیوستن فولاد جدیدی به این گروه صورت نگرفته است. از فولادهای مذکور علیرغم استحکام تسلیم قابل توجهشان پس از مرحله عملیات حرارتی بعلت فقدان چقرمگی شکست و استحکام به ضربه بالا، نمی‌توان از حداکثر قابلیت استحکامشان استفاده نمود. از این رو کلیه