بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه بیرجند

دانشکده فنی مهندسی

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک (طراحی و کاربردی)

عنوان:

آنالیز سطح شکست نمونه تست پارگی در فولاد API X70

استاد راهنما:

دکتر سید حجت هاشمی

نگارش:

ثارالله صدقی شنبه بازاری

زمستان ۸۹

چکیده

در تحقیق حاضر نتایج SEM آزمون گشودگی نوک ترک در فولاد API X70 (مورد استفاده در شبکه‌های پرفشار انتقال گاز طبیعی ایران) ارائه می‌گردد.

ریز ساختار فولاد مورد آزمایش، شامل سه ناحیه (فلز پایه، ناحیه متأثر از حرارت و فلز جوش) است. عکسبرداری سطوح شکست نمونه‌های تست CTOA از فلز پایه و درزجوش با استفاده از دستگاه SEM انجام گرفت.

نتایج بررسی سطوح شکست دو نمونه فلز پایه و درز جوش حاصل از آزمایش پارگی نشان می‌دهد که علیرغم وجود تفاوت در دو ناحیه، مورفولوژی سطح شکست از نوع اتصال حفره‌ها می‌باشد.

فهرست مطالب

عنوان صفحه

فهرست شکل‌ها .....الف
فهرست جداول .....ز
فهرست علائم .....ط

فصل اول: اهمیت انرژی.....۱

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- انرژی ۳

۱-۳- انرژی‌های فسیلی ۳

۱-۴- زغال سنگ ۴

۱-۴-۱- منشاء تشکیل زغال سنگ..... ۴

۱-۴-۲- خاصیت حرارتی زغال‌سنگ ۵

۱-۴-۳- کاربردهای مهم زغال سنگ..... ۶

۱-۵- سوخت‌های مایع ۷

۱-۵-۱- مزایای سوخت‌های مایع..... ۷

۱-۵-۲- معایب سوخت‌های مایع ۸

۱-۶- نفت ۸

۱-۶-۱- مشخصات نفت خام ۹

۱-۶-۲- تاریخچه نفت..... ۱۰

۱-۶-۳- تاریخچه استخراج نفت در ایران ۱۱

۱-۶-۴- پیدایش و نحوه استخراج نفت خام ۱۲

۱-۶-۵- توزیع جغرافیایی حوضه‌های نفتی..... ۱۳

۱-۶-۶- ذخایر اثبات شده نفت خام ۱۴

۱-۷- سوخت‌های گازی..... ۱۴

۱-۷-۱- مزایای سوخت‌های گازی ۱۵

۱-۸- گاز طبیعی ۱۵

۱-۸-۱- مشخصات گاز طبیعی ۱۶

۱-۸-۲- تاریخچه استفاده از گاز طبیعی ۱۷

۱-۸-۳- ذخایر اثبات شده گاز طبیعی ۱۷

۱-۸-۴- تولید گاز طبیعی ۱۹

۱-۸-۵- مصرف گاز طبیعی ۱۹

۱-۹- انرژی‌های تجدید پذیر ۲۰

۱-۹-۱- نگاه اجمالی به انرژی‌های تجدیدپذیر ۲۰

۱-۹-۲- آمار استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در جهان ۲۱

۱-۹-۳- پتانسیل و تجربیات به کارگیری منابع انرژی تجدیدپذیر در ایران ۲۲

فصل دوم: انتقال گاز طبیعی به وسیله خطوط لوله ۲۳

۲-۱- مقدمه ۲۴

۲-۲- لوله‌های انتقال گاز ۲۶

۲-۲-۱- تاریخچه صنعت خط لوله انتقال انرژی ۲۶

۲-۲-۲- صنعت خط لوله انتقال گاز ایران ۲۷

۲-۲-۳- توان صادرات گاز طبیعی ایران از طریق خط لوله ۲۸

۲-۳- توسعه پروژه‌های خطوط لوله ۳۰

۲-۳-۱- مقدمه ۳۰

۲-۳-۲- احداث خط لوله ۳۰

۲-۳-۳- واحدهای تقویت فشار ۳۲

۲-۳-۴- اندازه‌گیری ۳۳

۲-۳-۵- تعمیر و نگهداری و ایمنی خط لوله ۳۴

۲-۳-۶- پاکسازی لوله ۳۵

۲-۳-۷- تعمیر خط لوله ۳۶

۲-۳-۸- بررسی نشتی گاز در مخازن و لوله‌های نفت و گاز ۳۶

۲-۴- تجارت گاز به وسیله خط لوله ۳۷

۲-۵- انتقال و توزیع گاز طبیعی در ایران ۳۸

۲-۶- ایمنی و بازدهی انتقال گاز از طریق لوله ۳۹

۲-۶-۱- روش‌های انتقال گاز در جهان ۳۹

۲-۶-۲- ایمنی ۳۹

۲-۶-۳- بازدهی ۴۰

۲-۷- استفاده از فن‌آوری‌های جدید برای انتقال گاز طبیعی ۴۱

۲-۷-۱- روش گاز طبیعی مایع برای انتقال گاز طبیعی ۴۱

۲-۷-۲- فناوری فرآورده‌های مایع برای انتقال گاز طبیعی ۴۳

۲-۷-۳- ویژگی‌های فناوری GTL برای ایران ۴۳

۲-۷-۴- استفاده از فناوری گاز طبیعی فشرده برای انتقال گاز طبیعی ۴۵

فصل سوم: فرآیند ساخت فولادAPI X70 ..... ۴۶

۳-۱- مقدمه ۴۷

۳-۲- فولاد ۴۷

۳-۲-۱- تعریف فولاد ۴۷

۳-۲-۲- طبقه بندی انواع فولادها ۴۷

۳-۲-۳- تاریخچه صنعت فولاد ایران ۴۸

۳-۲-۴- انواع فرایندهای تولید فولاد ۴۸

۳-۳- نقش عناصر آلیاژی در فولادها.....۴۹

۳-۳-۱- نیکل ۴۹

۳-۳-۲- کرم..... ۵۰

۳-۳-۳- مولیبدن ۵۰

۳-۳-۴- وانادیم ۵۰

۳-۳-۵- منگنز ۵۱

۳-۳-۶- سیلیسیم ۵۱

۳-۳-۷- مس ۵۱

۳-۳-۸- آلومنیوم ۵۱
۳-۳-۹- بور ۵۲

۳-۴- فولادهای پر استحکام ۵۲
۳-۴-۱- تاریخچه فرآیند ترمو مکانیکال ۵۲
۳-۴-۲- توسعه و پیشرفت تولید فولادهای پر استحکام ۵۴

۳-۵- تأثیر ریزساختار فولاد بر چقرمگی آن ۵۷

۳-۶- فرآیند تولید فولاد X70 ..... ۵۹
۳-۶-۱- تولید فولاد X70 برای مصرف در خط لوله ۵۹
۳-۶-۲- نقش نیوبیم ۶۱
۳-۶-۳- آزمایش تولید ۶۲

فصل چهارم: تولید لوله‌های درزدار با جوش مارپیچ ۶۵

۴-۱- تاریخچه لوله فولادی ۶۶

۴-۲- مقدمه‌ای برای تولید لوله فولادی ۶۷

۴-۳- روش‌های تولید لوله فولادی ۶۸
۴-۳-۱- لوله‌های بدون درز ۶۸
۴-۳-۲- لوله‌های درزدار ۶۹
۴-۳-۲-۱- لوله‌های تولید شده به‌وسیله فرآیند جوش ذوبی ۶۹
۴-۳-۲-۲- لوله‌های تولید شده تحت جوشکاری مقاومت الکتریکی ۷۰
۴-۳-۲-۳- فرآیند جوشکاری زیر پودری ۷۰

۴-۴- تولید لوله به روش جوشکاری زیر پودری ۷۱
۴-۴- ۱- تولید لوله درز مستقیم به روش U&O ۷۱
۴-۴-۲- تولید لوله به روش نورد و جوشکاری ۷۳
۴-۴-۳- تولید لوله به روش جوش مارپیچ ۷۳
۴-۴-۳-۱- مقدمه‌ای بر تولید لوله به روش جوش مارپیچ ۷۳
۴-۴-۳-۲- موارد استفاده از لوله‌های مارپیچ ۷۴
۴-۴-۳-۳- روش‌های تولید لوله جوش مارپیچ ۷۴

۴-۴-۳-۴- رابطه هندسی در شکل‌دهی لوله اسپیرال ۷۹
۴-۴-۳-۵- جهت مطلوب برای درز مارپیچ ۸۰
۴-۴-۳-۶- مزایای استفاده از لوله اسپیرال ۸۱

فصل پنجم: آزمایش‌های مکانیکی متداول(تست‌های مخرب) ۸۳

۵-۱- مقدمه ۸۴

۵-۲- آزمون کشش ۸۴
۵-۲-۱- مشخصاتی که از آزمایش کشش به‌دست می‌آیند ۸۵
۵-۲-۱-۱- تنش تسلیم ۸۵
۵-۲-۱-۲- استحکام نهایی یا کششی ۸۶
۵-۲-۱-۳- قانون هوک ۸۶
۵-۲-۱-۴- داکتیلیتی یا میزان قابلیت تغییر فرم پلاستیک ۸۶
۵-۲-۱-۵- قابلیت ارتجاعی ۸۸
۵-۲-۱-۶- چقرمگی ۸۹

۵-۳- آزمایش فشار ۸۹

۵-۴- آزمایش پیچش ۹۰

۵-۵- آزمایش سختی ۹۰
۵-۵-۱- سختی برینل ۹۲
۵-۵-۲- سختی ویکرز ۹۲
۵-۵-۳- سختی راکول ۹۳
۵-۵-۴- میکروسختی ۹۴

۵-۶- تست ضربه ۹۴

۵-۷- آزمایش خزش ۱۰۰

۵-۸- آزمون خستگی ۱۰۲

فصل ششم: مبانی شکست ۱۰۴

۶-۱- مقدمه ۱۰۵

۶-۲- شکست ۱۰۶

۶-۲-۱- انواع شکست ۱۰۶

۶-۲-۲- جنبه‌های متالوگرافی و ریزساختاری شکست ۱۰۷

۶-۳- شکست نرم ۱۰۸

۶-۳-۱- مراحل تشکیل ترک در شکست نرم ۱۰۸

۶-۴- شکست ترد ۱۱۰

۶-۴-۱- مراحل تشکیل ترک در مواد ترد ۱۱۱

۶-۴-۱-۱- شکست ترد مرزدانه‌ای ۱۱۲

۶-۴-۱-۲- شکست ترد درون‌دانه‌ای ۱۱۴

۶-۵- آنالیز تنش ترک‌ها ۱۱۵

فصل هفتم: بررسی ریزساختار نواحی فلز جوش و فلز پایه فولاد X70 در جوشکاری زیرپودری ۱۱۶

۷-۱- ترکیبات شیمیایی فولاد X70 و فلز جوش ۱۱۷

۷-۱-۱- ترکیب شیمیایی فولاد X70 ..... ۱۱۷

۷-۱-۲- ترکیب شیمیایی فلز جوش ۱۱۸

۷-۲- بررسی ریزساختار فلز جوش ۱۱۸

۷-۲-۱- نمونه مورد بررسی ۱۱۸

۷-۲-۲- عملیات قبل از انجام عکسبرداری بر روی نمونه ۱۱۹

۷-۲-۳- نواحی فلز جوش ۱۱۹

۷-۲-۴- بررسی ریزساختار نواحی فلز جوش با استفاده از میکروسکوپ نوری ۱۱۹

۷-۳- تست سختی برای فلز جوش فولاد X70 ..... ۱۲۳

۷-۳-۱- رابطه بین پروفیل سختی و ریزساختار فلز جوش ۱۲۳

۷-۴- نرخ سرد شدن فلز جوش ۱۲۷

فصل هشتم: آزمایش باز شدگی نوک ترک در شکست نرم فولاد خطوط لوله انتقال گاز API X70 ..... ۱۲۹

۸-۱- مقدمه ۱۳۰

۸-۲- معرفی فولاد مورد آزمایش ۱۳۲

۸-۳- خصوصیات مکانیکی فولاد مورد آزمایش (API X70) ۱۳۲

۸-۴- تشریح نمونه آزمایشگاهی ۱۳۲

۸-۵- قید و بند بارگذاری در آزمون CTOA ۱۳۶

۸-۶- وسیله اندازه گیری باز شدن دهانه ترک ۱۳۸

۸-۷- مدل شکست CTOA ۱۳۹

۸-۸- اندازه گیری زاویه باز شدگی نوک ترک ۱۴۰

۸-۸-۱- نحوه اندازه گیری CTOA ۱۴۰

۸-۸-۲- انواع روش‌های اندازه‌گیری CTOA ۱۴۱

۸-۸-۲-۱- اندازه گیری مستقیم CTOA ۱۴۱

۸-۸-۲-۲- اندازه‌گیری غیرمستقیم CTOA ۱۴۳

۸-۸-۳- مقایسه بین روش‌های اندازه‌گیری CTOA در تست‌های شبه استاتیکی ۱۴۴

۸-۹- بررسی معیار مقاومت CTOA در جوش محیطی ۱۴۵

۸-۱۰- نتایج تست CTOA در فولاد X70 ..... ۱۴۷

فصل نهم: بررسی سطوح شکست ۱۶۱

۹-۱- مقدمه ۱۵۹

۹-۲- میکروسکوپ الکترون روبشی ۱۶۰

۹-۳- مودهای شکست ۱۶۲

۹-۳-۱- گسیختگی حفره‌ها ۱۶۲
۹-۳-۲- شکست تورق ۱۶۸
۹-۳-۳- شکست خستگی..... ۱۷۱
۹-۳-۴- گسیختگی غیر چسبنده..... ۱۷۲

۹-۴- شکست های منحصر به فرد ۱۷۳
۹-۴-۱- شکست شبه‌تورق..... ۱۷۳

۹-۵- بررسی سطوح شکست نمونه‌های فلز پایه و درزجوش فولاد API X70 ..... ۱۷۴
۹-۵-۱- بررسی مودهای شکست در تست CTOA ۱۷۵
۹-۵-۲- بررسی سطوح شکست نمونه فلز پایه پس از انجام تست CTOA..... ۱۷۶
۹-۵-۳- بررسی سطوح شکست نمونه درزجوش پس از انجام تست CTOA ۱۸۱
۹-۵-۴- مقایسه سطوح شکست نمونه‌های فلز پایه و درزجوش ۱۸۶
۹-۵-۵- مقایسه سطوح شکست ۱۸۸

فصل دهم: نتیجه گیری و پیشنهادات ۲۰۰

۱۰-۱- نتیجه‌گیری ۱۹۸

۱۰-۲- پیشنهادات ۲۰۰

مراجع ۲۰۱

فهرست شکل ها

فصل اول : اهمیت انرژی

شکل ۱-۱- نمایی از زغال سنگ..... ۵
شکل ۱-۲- نمایی از یک چشمه نفت خام..... ۹
شکل ۱-۳- نمایی از اولین دکل‌های حفاری. ۱۱
شکل ۱-۴- اولین چاه نفت ایران در مسجد سلیمان. ۱۲
شکل ۱-۵ - نمایی از یک سکوی حفاری پیشرفته نفت خام..... ۱۳
شکل ۱-۶- ذخایر گاز طبیعی در مناطق مختلف جغرافیایی در جهان تا سال ۲۰۰۹ میلادی ۱۷
شکل ۱-۷- برخی از منابع تولید انرژی تجدید پذیر ۲۱

فصل دوم : انتقال گاز طبیعی به وسیله خطوط لوله

شکل ۲-۱- نمایی از خط لوله انتقال گاز. ۲۵
شکل ۲-۲- نمایی از خط انتقال گاز در ایران. ۲۹
شکل ۲-۳- عملیات جوشکاری بر روی لوله‌های انتقال گاز. ۳۱
شکل ۲-۴- الگوریتم مزایای به کارگیری خط لوله. ۴۰
شکل ۲-۵- کشتی حامل گاز مایع ۴۲

فصل سوم : فرآیند ساخت فولاد API X70

شکل ۳-۱- روند توسعه فولادهای پراستحکام. ۵۴
شکل ۳-۲- بررسی گریدهای فولادهای خط لوله..... ۵۵
شکل ۳-۳- پیشرفت و توسعه چقرمگی فولادهای خطوط لوله برحسب گذر زمان تولید فولاد ۵۶
شکل ۳-۴- رابطه بین مقدار کربن و تنش تسلیم برای فولادهای خطوط لوله پرفشار..... ۵۷
شکل ۳-۵- مکانیزم‌های مختلف جهت افزایش استحکام فولادهای با گرید بالاتر از X60 . ..... ۵۸
شکل ۳-۶-الف) ریز ساختار نرمالیزه شده فولاد X60، ب) ریزساختار ترمو مکانیکال فولاد X70 ج)ریزساختار سرد کرن سریع فولادX80..... ۵۹
شکل ۳-۷- تأخیر در تبلور مجدد با میکرو آلیاژ کردن. ۶۱
شکل ۳-۸- ریزساختار فریت سوزنی سه نمونه از فولاد با آلیاژهای مختلف..... ۶۳

فصل چهارم: تولید لوله‌های درزدار با جوش مارپیچ

شکل ۴-۱- لوله‌های انتقال آب در گذشته ۶۶
شکل ۴-۲- لوله پرچی ساخته شده در سال ۱۸۵۸م. ۶۷
شکل ۴-۳- مراحل تولید لوله به روش جوشکاری ذوبی. ۶۹
شکل ۴-۴- فرآیند جوشکاری زیرپودری ۷۱
شکل ۴-۵- شکل‌دهی در پرس U شکل. ۷۲
شکل ۴-۶- کامل شدن لوله درزدار مستقیم در پرس O شکل ۷۲
شکل ۴-۷- فرآیند شکل‌دهی لوله مارپیچ به روش همزمان ۷۴
شکل ۴-۸- فرآیند تولید لوله اسپیرال به‌روش جوشکاری و شکل‌دهی هم‌زمان ۷۵
شکل ۴-۹- نمایی از تست هیدرو استاتیک و ماشین‌کاری نهایی. ۷۶
شکل ۴-۱۰- دیاگرام تولید لوله مارپیچ به روش جوش نقطه‌ای ۷۷
شکل ۴-۱۱- دیاگرام فرآیند تولید لوله مارپیچ با وجود شکل‌دهی جداگانه و جوش‌کاری خطی. ۷۸
شکل ۴-۱۲- دیاگرام هندسی جوش مارپیچ ۷۹
شکل ۴-۱۳- نمودار رابطه بین $\frac{\sigma_N}{\sigma_U}$ و زاویه مارپیچ ۸۱

فصل پنجم: آزمایش‌های مکانیکی متداول (تست‌های مخرب)

شکل ۵-۱- رابطه تنش تسلیم و نرمی فلز ۹۵
شکل ۵-۲- آزمایش ضربه. ۹۶
شکل ۵-۳- شماتیک دستگاه تست ضربه ۹۷
شکل ۵-۴- راستای اعمال بار به نمونه‌های تست ضربه.الف) نمونه شارپی در تست ضربه؛ب) نمونه ایزود در تست ضربه. ۹۹
شکل ۵-۵- منحنی عمومی خزش. ۱۰۲

فصل ششم: مبانی شکست

شکل ۶-۱- تشکیل ترک ناشی از جوانه‌زنی و رشد حفره. ۱۰۹
شکل ۶-۲- سطح مقطع شکست نرم. ۱۱۰
شکل ۶-۳- سطح مقطع شکست ترد. ۱۱۱
شکل ۶-۴- مسیر رشد ترک در شکست مرزدانه‌ای. ۱۱۲
شکل ۶-۵- سطح شکست نمونه فولادی که تحت شکست مرزدانه‌ای گسیخته شده است ۱۱۳

شکل ۶-۶- مسیر رشد ترک در شکست درون‌دانه‌ای. ۱۱۴
شکل ۶-۷- سطح شکست درون‌دانه‌ای..... ۱۱۴
شکل ۶-۸- انواع مدل‌های ترک ۱۱۵

فصل هفتم: بررسی ریزساختار نواحی فلز جوش و فلز پایه فولاد X70 در جوشکاری زیرپودری

شکل ۷-۱- تصویر ماکرو از نواحی مختلف موجود در فلز جوش..... ۱۱۸
شکل ۷-۲- تصویر ریزساختار ناحیه فلز پایه.الف) ریزساختار فلز پایه با بزرگنمایی 100X.ب)ریزساختار فلز پایه با بزرگنمایی 500X. ۱۲۰
شکل ۷-۳- تصویر ریزساختار ناحیه HAZ .الف)ریزساختار ناحیه HAZ درشت‌دانه با بزرگنمایی 500X ب)ریزساختار ناحیه HAZ ریزدانه با بزرگنمایی 500X. ۱۲۰
شکل ۷-۴- تصاویر از ریزساختار ناحیه HAZ که شامل فریت‌سوزنی-بینیت است.الف) دانه‌های درشت در نزدیک ناحیهFZ .ب) دانه‌های ریز نزدیک ناحیه BM. ۱۲۱
شکل ۷-۵- تصویر ریزساختار ناحیه ذوب با بزرگنمایی 500X. ۱۲۲
شکل ۷-۶- تصویر مرز بین نواحی FZ وHAZ ۱۲۲
شکل ۷-۷- پروفیل کارسختی برای نواحی فلزجوش..... ۱۲۳
شکل ۷-۸- پروفیل دمایی نقاط موجود در HAZ بر حسب فاصله از مرکز ذوب ۱۲۵
شکل ۷-۹- زمان کامل انحلال رسوبات کاربیدی و نیتریدی مختلف در آستنیت تابع دما. ۱۲۶
شکل ۷-۱۰- دیاگرام CCT مربوط به فولاد X70 ..... ۱۲۷

فصل هشتم: آزمایش باز شدگی نوک ترک در شکست نرم فولاد خطوط لوله انتقال گاز API X70

شکل ۸-۱- تصویر نمونه بریده شده از لوله X70. ..... ۱۳۳
شکل ۸-۲- جهت برش نمونه MDCB در لوله X70. ..... ۱۳۴
شکل ۸-۳- ابعاد هندسی نمونه آزمون CTOA از فولاد API X70. ..... ۱۳۴
شکل ۸-۴- قید و بند بارگذاری نصب شده روی ماشین Zwick در آزمون تست CTOA..... ۱۳۶
شکل ۸-۵- تصویر قید و بند بارگذای طراحی شده برای ماشین تست آزمایشگاهی..... ۱۳۷
شکل ۸-۶- تصویر نمونه تست به صورت بسته شده در بین صفحات بارگذاری فوقانی و تحتانی..... ۱۳۷
شکل ۸-۷- تصویر ابزار اندازه‌گیر نصب شده روی نمونه. ۱۳۹
شکل ۸-۸- نحوه اندازه‌گیری CTOA. ۱۴۰
شکل ۸-۹- اندازه‌گیری CTOA با روش مستقیم ۱۴۱

شکل ۸-۱۰-الف)اندازه‌گیری مقادیر بحرانی CTOA با استفاده ازروش اول.ب)اندازه‌گیری مقادیر بحرانی CTOA با استفاده از روش دوم..... ۱۴۳
شکل ۸-۱۱- اندازه‌گیری CTOA با روش غیر مستقیم..... ۱۴۴
شکل ۸-۱۲- نمودار مقاومت CTOA بر حسب طول ترک. ۱۴۴
شکل ۸-۱۳ منحنی مقاومت CTOA برای فولاد X100 در جوش محیطی. ۱۴۶
شکل ۸-۱۴- تصویر نمونه بعد از انجام تست..... ۱۴۷
شکل ۸-۱۵- تصاویر رشد ترک حین آزمایش نمونه فلز پایه. الف) ابتدای رشد ترک؛ ب و ج) رشد ترک در حالت پایدار؛ د) رشد ترک در مرحله شکل‌گیری لولای پلاستیک..... ۱۴۸
شکل ۸-۱۶- منحنی زوایای اندازه‌گیری شده در نوک ترک بر حسب طول ترک برای نمونه فلز پایه..... ۱۴۹
شکل ۸-۱۷- منحنی زوایای اندازه‌گیری شده در اولین خطوط شبکه بر حسب طول ترک برای نمونه فلز پایه.. ..... ۱۵۰
شکل ۸-۱۸- منحنی زوایای اندازه‌گیری شده در دومین خطوط شبکه بر حسب طول ترک برای نمونه فلز پایه..... ۱۵۱
شکل ۸-۱۹- منحنی زوایای اندازه‌گیری شده در سومین خطوط شبکه بر حسب طول ترک برای نمونه فلز پایه.. ..... ۱۵۲
شکل ۸-۲۰- تغییرات زاویه بازشدگی نوک ترک بر حسب طول ترک برای نمونه فلز پایه..... ۱۵۳
شکل ۸-۲۱- تصاویر رشد ترک حین آزمایش نمونه درزجوش. الف) ابتدای رشد ترک؛ ب و ج) رشد ترک در حالت پایدار؛ د) رشد ترک در مرحله شکل‌گیری لولای پلاستیک.. ..... ۱۵۳
شکل ۸-۲۲- منحنی زوایای اندازه‌گیری شده در نوک ترک بر حسب طول ترک برای نمونه درزجوش ۱۵۴
شکل ۸-۲۳- منحنی زوایای اندازه‌گیری شده در اولین خطوط شبکه بر حسب طول ترک برای نمونه درزجوش..... ۱۵۵
شکل ۸-۲۴- منحنی زوایای اندازه‌گیری شده در دومین خطوط شبکه بر حسب طول ترک برای نمونه نمونه درزجوش ۱۵۶
شکل ۸-۲۵- منحنی زوایای اندازه‌گیری شده در سومین خطوط شبکه بر حسب طول ترک برای نمونه درزجوش.. ..... ۱۵۶
شکل ۸-۲۶- تغییرات زاویه بازشدگی نوک ترک بر حسب طول ترک برای نمونه درزجوش..... ۱۵۷

فصل نهم: بررسی سطوح شکست

شکل ۹-۱- روش پیمایش SEM بر روی نمونه..... ۱۶۱
شکل ۹-۲- نمایش برخورد پرتوها به نمونه ۱۶۱
شکل ۹-۳- نمایش شماتیک رشد و تشکیل حفره‌ها..... ۱۶۳
شکل ۹-۴- ادغام حفره‌ها در شکست نرم..... ۱۶۴
شکل ۹-۵- تشکیل حفره‌های همسان تحت کشش تک محوره برای نمونه مسی..... ۱۶۴
شکل ۹-۶- تشکیل حفره‌های جهت دار تحت بارگذاری برشی در نمونه فولاد پر استحکام..... ۱۶۵

شکل ۹-۷- تأثیر سه حالت متفاوت تنش بر مورفولوژی ریز حفره:الف) تأثیر تنش‌کششی بر تشکیل حفره؛ب) تأثیر تنش برشی خالص بر تشکیل حفره؛ج) تأثیر پارگی بر تشکیل حفره. ۱۶۶
شکل ۹-۸- تشکیل حفره‌های کشیده شده تحت موقعیت الف) شکست پارگی در مود اول .ب) شکست برشی. ۱۶۷
شکل ۹-۹- الف)سطح شکست نمونه فولادی با حفره‌های کم‌عمق.ب) سطح شکست نمونه فولادی با حفره‌های عمیق. ۱۶۷
شکل ۹-۱۰- تشکیل شکست تورق.الف) به دلیل انحراف مرزها ب) به دلیل پیچش مرزها ۱۶۸
شکل ۹-۱۱-الف) شکست تورق مدل رودخانه‌ای در فولاد کم کربن که به‌وسیله تست ضربه شکسته شده. ب) شکست تورق موسوم به زبانه برای فلز جوش فولاد ۳۰٪ کروم..... ۱۶۹
شکل ۹-۱۲- سطح شکست تورق در شکست ترد با خطوط رودخانه. ۱۷۰
شکل ۹-۱۳-الف) شکست تورق از نوع رخ برگی برای فلز جوش فولاد کروم‌دار. ب) شکست تورق مرحله‌ای که به‌صورت درون‌دانه‌ای شکسته شده. ۱۷۰
شکل ۹-۱۴- سطح شکست خستگی در فلز تیتانیوم. ۱۷۱
شکل ۹-۱۵- شکست غیر چسبنده.الف) غیر چسبندگی روی مرزدانه‌های هم‌شکل.ب) غیرچسبندگی روی مرزدانه‌های ضعیف.ج) غیرچسبندگی روی مرزدانه‌های کشیده..... ۱۷۲
شکل ۹-۱۶-گسیختگی غیرچسبنده در نمونه فولادی. الف) ماکروگراف سطح شکست.ب) میکروگراف سطح شکست. ۱۷۳
شکل ۹-۱۷- سطح شکست نمونه آستنیتی گسیخته شده به‌وسیله فرآیند شبه تورق ۱۷۴
شکل ۹-۱۸- تصویر شماتیک از ایجاد تونل به‌وسیله رشد ترک نرم و انتقال شکست از حالت تخت به مایل ۱۷۵
شکل ۹-۱۹- انتقال شکست از حالت تخت به برشی در آزمایش پارگی شکست نرم شبه دینامیکی. ۱۷۵
شکل ۹-۲۰- سطح شکست نمونه فلز پایه. ۱۷۶
شکل ۹-۲۱- ناحیه رشد پایدار ترک در نمونه فلز پایه..... ۱۷۷
شکل ۹-۲۲- سطح شکست نمونه MDCB با ضخامت ۸ میلی‌متر از فولاد X70 در تست CTOA ۱۷۸
شکل ۹-۲۳-الف) سطح شکست نمونه فلز پایه.ب) عکس گرفته شده از سطح شکست قطعه بریده شده از نمونه فلز پایه بوسیله SEM. ۱۷۹
شکل ۹-۲۴- تصویر میکروگراف از سطح شکست نمونه فلز پایه با بزرگنمایی ۳۰۰۰X. ۱۷۹
شکل ۹-۲۵- سطوح شکست فلز پایه.الف) تصویر میکروگراف از سطح شکست فلز پایه در لبه بالایی نمونه با بزرگنمایی ۵۰۰X.ب) تصویر میکروگراف از سطح شکست فلز پایه در مرکز نمونه با بزرگنمایی ۵۰۰X.ج) تصویر میکروگراف از سطح شکست فلز پایه در لبه پایینی نمونه با بزرگنمایی ۵۰۰ X. ۱۸۰
شکل ۹-۲۶- نمونه درزجوش بعد از برش. ۱۸۱
شکل ۹-۲۷- سطح شکست نمونه درزجوش. ۱۸۲
شکل ۹-۲۸- رشد پایدار ترک در نمونه درزجوش..... ۱۸۳

شکل ۹-۲۹-الف) سطح شکست نمونه درزجوش.ب) عکس گرفته شده از سطح شکست قطعه بریده شده از نمونه درزجوش بوسیله SEM. ۱۸۳
شکل ۹-۳۰- تصویر میکروگراف از سطح شکست نمونه درزجوش با بزرگنمایی۳۰۰۰X..... ۱۸۴
شکل ۹-۳۱- سطوح شکست نمونه درزجوش.الف) تصویر جوش میکروگراف از سطح شکست درزجوش در لبه بالایی نمونه با بزرگنمایی ۱۰۰X ب) تصویر میکروگراف از سطح شکست درزجوش در مرکز نمونه با بزرگنمایی ۱۰۰X ج) تصویر میکروگراف از سطح شکست درزجوش در لبه پایینی نمونه با بزرگنمایی ۱۰۰X. ۱۸۵
شکل ۹-۳۲- سطوح شکست نمونه‌های درزجوش و فلز پایه.الف و ب) تصاویر میکروگراف سطوح شکست فلز پایه از مرکز نمونه با بزرگنمایی۱۰۰X. ج و د) تصاویر میکروگراف سطوح شکست درزجوش از مرکز نمونه با بزرگنمایی ۱۰۰ X. ۱۸۶
شکل ۹-۳۳- سطوح شکست نمونه‌های فلز پایه و درزجوش.الف) سطح شکست نمونه فلز پایه با بزرگنمایی ۳۰۰۰X؛ب) سطح شکست نمونه درزجوش با بزرگنمایی۳۰۰۰X. ۱۸۷
شکل ۹-۳۴- سطوح شکست نمونه‌های فلز پایه و فلز جوش در نمونه‌های شارپی.الف) تصویر میکروگراف از مرکز سطح شکست نمونه فلز پایه. ب) تصویر میکروگراف از مرکز سطح شکست نمونه فلز جوش..... ۱۸۸
شکل ۹-۳۵- سطح شکست نمونه شارپی فلز جوش در فولاد X70. ..... ۱۸۹
شکل ۹-۳۶- سطوح شکست نمونه SENB فولاد API 2W GR 50 در تست شارپی.الف) تصویر میکروگراف از سطح شکست نمونه با بزرگنمایی کم ۵۰X.ب) تصویر میکروگراف از سطح شکست نمونه با بزرگنمایی بالا ۵۰۰X..... ۱۹۰
شکل ۹-۳۷- تصویر ریزساختار نمونه.الف) ریزساختار روی سطح نمونه.ب) ریزساختار در یک چهارم ضخامت نمونه.ج) ریزساختار نصف ضخامت نمونه. ۱۹۱
شکل ۹-۳۸- تصویر میکروگراف SEM از $\frac{۱}{۴}$ ضخامت صفحه فولادی..... ۱۹۲
شکل ۹-۳۹- تصویر میکروگراف از سطح شکست نمونه تست کشش..... ۱۹۳
شکل ۹-۴۰- تصویر سطح شکست ناحیه جوش محیطی در فولاد خط لوله X70.الف) تصویر ماکرو از سطح شکست ناحیه جوش.ب) تصویر میکروگراف از سطح شکست ناحیه جوش.ج) تصویر میکروگراف از سطح شکست ناحیه جوش با بزرگنمایی بالا..... ۱۹۳
شکل ۹-۴۱- سطح شکست فولاد ضد زنگ سوپرآستنیتی بعد از انجام تست کشش.الف) تصویر میکروگراف از سطح شکست نمونه در تست کشش با نرخ کرنش پایین ۰/۰۰۰۱ ب) تصویر میکروگراف از سطح شکست نمونه در تست کشش با نرخ کرنش بالای ۰/۱..... ۱۹۴
شکل ۹-۴۲- سطوح شکست فولاد ضد زنگ آستنیتی AISI 316L بعد از انجام تست انرژی شارپی.الف) تصویر میکروگراف سطح شکست فلز جوش با بزرگنمایی ۵۰۰X.ب) تصویر میکروگراف سطح شکست فلز جوش با بزرگنمایی۱۰۰۰X.ج) تصویر میکروگراف سطح شکست فلزپایه با بزرگنمایی۵۰۰X. ۱۹۶

فهرست جدول ها

فصل اول: اهمیت انرژی

جدول ۱-۱- ترکیبات وزنی نفت خام. ۱۰
جدول ۱-۲- ذخایر اثبات شده نفت خام. ۱۴
جدول ۱-۳- ذخایر گاز طبیعی در کشورهای جهان تا سال ۲۰۰۹ میلادی. ۱۸
جدول ۱-۴- تولیدگاز طبیعی در جهان. ۱۹
جدول ۱-۵- مصرف گاز در جهان ۲۰

فصل دوم: انتقال گاز طبیعی به وسیله خطوط لوله

جدول ۲-۱- فاصله حمل و نقل ۱ تن مواد نفتی با هزینه $ ۱ ..... ۴۰

فصل سوم: فرآیند ساخت فولاد API X70

جدول ۳-۱- ترکیبات شیمیایی در آزمایش مقدماتی برای فرآیند بهینه سازی. ۶۲
جدول ۳-۲- ترکیبات شیمیایی مورد نیاز برای تولید فولاد X70 ..... ۶۴

فصل ششم: مبانی شکست

جدول ۶-۱- ویژگی‌های شکست نرم و ترد. ۱۱۱

فصل هفتم: بررسی ریزساختار نواحی فلز جوش و فلز پایه فولاد X70 در جوشکاری زیرپودری

جدول ۷-۱- ترکیبات شیمیایی فلز پایه X70 به همراه مقادیر استاندارد API 5L. ۱۱۷
جدول ۷-۲- ترکیبات شیمیایی فلز جوش به همراه استانداردهای API 5L و EA2. ..... ۱۱۸
جدول ۷-۳- مقادیر متغییرهای استفاده شده در معادله‌ی آدامز. ۱۲۵
جدول ۷-۴- مقادیر متغییرهای استفاده شده در روابط ۷-۶ و ۷-۷. ..... ۱۲۸

فصل هشتم: آزمایش باز شدگی نوک ترک در شکست نرم فولاد خطوط لوله انتقال گاز API X70

جدول ۸-۱- نتایج آزمایش کشش فولاد در جهت محیطی در دمای محیط. ۱۳۲

فصل نهم: بررسی سطوح شکست

جدول ۹-۱- ترکیب شیمیایی نمونه شارپی. ۱۹۰
جدول ۹-۲- ترکیب شیمیایی فولاد API 2W GR 50. ..... ۱۹۰
جدول ۹-۳- ترکیب شیمیایی صفحه فولادی..... ۱۹۱
جدول ۹-۴- ترکیب شیمیایی فولاد ضدزنگ ۲۵۴ SMO..... ۱۹۴
جدول ۹-۵- ترکیب شیمیایی فولاد ضد زنگ آستنیتی AISI 316L..... ۱۹۵

فهرست علائم

زاویه درزمارپیچ	ϕ
قطر خارجی	D
عرض ورق	B
گام درزجوش	S
طول درزجوش	L_S
سرعت جوش	V_S
سرعت محیطی	V_U
سرعت محوری لوله	V_P
تنش نرمال	σ_N
تنش طولی	σ_L
تنش محیطی	σ_U
مدول الاستیسیته	E
تنش	σ
کرنش	ε
طول نهایی	l_f
سطح مقطع نهایی	A_f
انرژی کرنشی در واحد حجم	U_R