

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

اصول خم کاری لوله های بویلر

اصول خم کاری لوله‌های بویلر

دکتر سیدابراهیم موسوی ترشیزی

محمد عابدی

۱۳۹۵

فهرست مطالب

پیشگفتار	یازده
فصل ۱. بویلرهای نیروگاهی، جنس و ابعاد لوله‌های آنها	۱
۱.۱. مقدمه	۱
۲.۱. بویلر و تجهیزات آن	۱
۱.۲.۱. اهمیت بویلر در نیروگاه	۱
۲.۲.۱. انواع بویلر	۲
۳.۲.۱. تجهیزات اصلی بویلرهای لوله آبی	۳
۳.۱. مشخصات و جنس لوله‌های مورد نیاز در بویلر	۳
۱.۳.۱. ترکیب شیمیایی	۴
۲.۳.۱. عملیات حرارتی	۵
۴.۱. ابعاد لوله‌های به‌کار گرفته شده در بویلر	۶
۱.۴.۱. ضخامت دیواره لوله	۷
۲.۴.۱. ابعاد لوله‌های مورد نیاز	۸
۳.۴.۱. لوله‌های بویلر از دید استاندارد EN	۱۰
منابع	۱۰
فصل ۲. روش‌های تولید و خم‌کاری لوله‌ها	۱۳
۱.۲. مقدمه	۱۳
۲.۲. روش‌های تولید لوله	۱۳
۱.۲.۲. لوله‌های بدون درز	۱۳
۲.۲.۲. فرایند تولید لوله درزدار	۱۶
۱.۲.۲.۲. تولید لوله جوشی با روش مقاومت الکتریکی (ERW)	۱۷
۲.۲.۲.۲. تولید لوله جوشی با روش قوس زیرپودری دوگانه (DSAW)	۱۸
۳.۲.۲.۲. تولید لوله جوشی با روش جوش کوره‌ای، جوش لب‌به‌لب یا جوش پیوسته	۱۸

۱۹.....	۴.۲.۲.۲ تولید لوله جوشی با روش قوس زیرپودری طولی
۲۰.....	۳.۲ اصول خم کاری لوله ها
۲۱.....	۴.۲ انواع روش ها و دستگاه های خم کاری
۲۲.....	۱.۴.۲ خم کاری سرد
۲۴.....	۱.۱.۴.۲ خم کاری کششی
۲۸.....	۲.۱.۴.۲ خم کاری فشاری
۲۹.....	۳.۱.۴.۲ خم کاری پرس
۳۴.....	۴.۱.۴.۲ خم کاری غلتشی
۳۷.....	۲.۴.۲ خم کاری گرم
۴۰.....	۱.۲.۴.۲ روش های گرم کردن لوله
۴۴.....	۲.۲.۴.۲ روش های خم کاری گرم
۵۵.....	۳.۴.۲ الزامات خم کاری
۵۷.....	۱.۳.۴.۲ روانکار
۵۸.....	۲.۳.۴.۲ تکیه گاه های داخلی
۷۰.....	۳.۳.۴.۲ عملیات حرارتی پس از خم کاری
۷۳.....	۴.۳.۴.۲ تمیزکاری پس از خم کاری
۷۴.....	منابع
۷۵.....	فصل ۳. عیوب ایجاد شده در فرایند خم کاری
۷۵.....	۱.۳ مقدمه
۷۶.....	۲.۳ عیوب ظاهری
۷۶.....	۱.۲.۳ شکستگی لوله
۷۶.....	۲.۲.۳ چروکیدگی
۷۷.....	۳.۲.۳ کاهش و افزایش ضخامت قسمت بیرونی و داخلی خم
۷۹.....	۴.۲.۳ گرد نبودن و کاهش سطح مقطع در محل خم
۸۱.....	۵.۲.۳ خراش های روی خط مرکزی لوله
۸۱.....	۶.۲.۳ خراش های ناشی از ابزار خم کاری
۸۲.....	۷.۲.۳ جمع شدگی ناحیه خم
۸۲.....	۸.۲.۳ برگشت فنری

منابع	۸۴
فصل ۴. استانداردهای خم کاری و بازرسی لوله‌ها	۸۵
۱.۴. مقدمه	۸۵
۲.۴. کنترل کیفیت	۸۵
۱.۲.۴. انواع هزینه‌های کیفیت	۸۶
۳.۴. کنترل کیفیت لوله‌ها پیش از خم کاری	۸۶
۴.۴. کنترل کیفیت لوله‌ها به‌هنگام خم کاری	۹۰
۵.۴. کنترل کیفیت لوله‌ها پس از خم کاری	۹۰
۱.۵.۴. نازک‌شدگی (کاهش ضخامت)	۹۱
۲.۵.۴. بیضوی شدن	۹۱
۳.۵.۴. کمانش	۹۲
۶.۴. کنترل کیفیت از دید استاندارد نظامی امریکا	۹۳
۱.۶.۴. آزمون احراز صلاحیت	۹۴
۲.۶.۴. معیارهای خم کاری	۹۵
۳.۶.۴. تنظیم و تصحیح	۹۶
۴.۶.۴. بازرسی	۹۷
۵.۶.۴. استانداردهای پذیرش	۹۷
۷.۴. کنترل کیفیت از دید استاندارد ASME B31.1	۱۰۰
۸.۴. کنترل کیفیت از دید استاندارد PFI	۱۰۲
۱.۸.۴. تolerانس‌های خطی و زاویه‌ای	۱۰۳
۲.۸.۴. تolerانس‌های شکلی	۱۰۴
۳.۸.۴. الزام‌های مواد در خم کاری داغ	۱۰۷
۹.۴. کنترل کیفیت و حد پذیرش‌ها از دید استاندارد VGB	۱۰۸
۱.۹.۴. عملیات حرارتی	۱۰۸
۲.۹.۴. شکل‌دهی	۱۰۹
۳.۹.۴. آزمون هیدرواستاتیک	۱۱۰
۴.۹.۴. آزمون لوله‌ها با عبور توپ	۱۱۰
۱.۰.۴. خم کاری طبق استاندارد BS 1113	۱۱۱

۱۱۱.....	۱.۱.۱۰.۴. تأیید درستی روش خم کاری
۱۱۱.....	۲.۱.۱۰.۴. سطح خم لوله‌ها
۱۱۲.....	۳.۱.۱۰.۴. نازک‌شدگی دیواره و خروج از مدور بودن
۱۱۲.....	۴.۱.۱۰.۴. عملیات حرارتی خم‌ها
۱۱۲.....	۵.۱.۱۰.۴. بازرسی نقص‌های عرضی
۱۱۳.....	۶.۱.۱۰.۴. آزمون سختی
۱۱۳.....	۷.۱.۱۰.۴. خم کاری دسته‌ای پانل‌ها
۱۱۳.....	۱.۱.۴. نرم‌افزارهای قابل استفاده در خم کاری لوله‌ها
۱۱۶.....	منابع

فصل ۵. فرایندهای تأمین کالا (لوله‌ها)..... ۱۱۷

۱۱۷.....	۱.۵. مقدمه
۱۱۷.....	۲.۵. سفارش‌دهی بر اساس استاندارد EN 10216
۱۱۹.....	۳.۵. سفارش‌دهی بر اساس استاندارد SA 450
۱۲۰.....	۴.۵. دسته‌بندی فرایندهای تأمین
۱۲۰.....	۵.۵. فرایندهای تأمین در سازمان
۱۲۱.....	۱.۵.۵. مراحل خرید کالا
۱۲۴.....	۶.۵. فرایندهای پیش از خم کاری
۱۲۵.....	۱.۶.۵. تعیین مشخصات فنی
۱۲۵.....	۲.۶.۵. انتخاب تأمین‌کننده و تنظیم قرارداد
۱۲۶.....	۳.۶.۵. ارزیابی فنی تأمین‌کننده
۱۲۷.....	۷.۵. فرایندهای تولید
۱۲۷.....	۸.۵. فرایندهای پس از تولید
۱۲۷.....	۹.۵. مسئولیت بخش‌های درگیر
۱۲۸.....	۱.۹.۵. اطلاعاتی که خریدار باید ارائه کند
۱۲۸.....	۲.۹.۵. محدوده کار تأمین‌کننده
۱۲۸.....	۳.۹.۵. محدوده کار کارشناس فنی مسئول خرید
۱۲۹.....	۱۰.۵. مشخصات فنی هنگام سفارش
۱۲۹.....	۱.۱.۱۰.۵. احراز درستی روش خم کاری

۱۲۹.....	۲.۱۰.۵. فرایند خم‌کاری
۱۲۹.....	۳.۱۰.۵. دمای خم‌کاری و عملیات حرارتی
۱۳۰.....	۴.۱۰.۵. تولرانس ابعادی
۱۳۱.....	۵.۱۰.۵. آزمون هیدرواستاتیک و عبور توپ
۱۳۱.....	۶.۱۰.۵. بازرسی غیرمخرب
۱۳۱.....	۷.۱۰.۵. علامت‌گذاری
۱۳۲.....	۸.۱۰.۵. سختی
۱۳۲.....	۹.۱۰.۵. بسته‌بندی
۱۳۳.....	۱۰.۱۰.۵. بازرسی نهایی خم‌ها پیش از تحویل
۱۳۳.....	۱۱.۵. تحویل‌گیری
۱۳۳.....	۱.۱۱.۵. بازرسی
۱۳۴.....	۱۲.۵. ضمانت
۱۳۵.....	منابع
۱۳۷.....	پیوست‌ها
۱۳۸.....	پیوست الف: جدول‌ها
۱۴۹.....	پیوست ب: تأثیر عناصر گوناگون بر ویژگی‌های فولاد
۱۵۳.....	پیوست ج: نمودار تعادلی آهن-کربن (Fe-C)
۱۵۷.....	واژه‌نامه توصیفی
۱۶۵.....	نمایه

پیشگفتار

با پیشرفت علم و توسعه صنایعی همچون صنایع نیروگاهی، خودرو، هوافضا، نفت و گاز، نظامی و ... روش‌های سنتی پاسخگوی تولید انبوه لوله‌ها با خم‌های متفاوت، اندازه دقیق و زوایای مختلف نخواهد بود. هم‌اکنون فناوری خم‌کاری لوله‌ها و انتخاب روش‌های مناسب موجود، نقش اساسی در صنایع دارد. دستیابی به روش‌های مناسب خم‌کاری، به‌ویژه برای لوله‌هایی که در شرایط دما و فشار بالا بهره‌برداری می‌شوند، اهمیت بسیاری در کاهش خرابی‌ها، هزینه خرید و خم‌کاری لوله‌ها دارد. علاوه بر آن، کنترل کیفیت خم‌کاری با توجه به استانداردهای معتبر در کاهش معایبی که ممکن است پس از فرایند خم‌کاری ایجاد شود، بسیار مؤثر است.

با حدود سی‌سال پیشینه کار و همکاری با صنعت برق و نیروگاه‌های کشور و همچنین صنایعی که در آنها از بویلرهای با ظرفیت‌های متوسط و بالا استفاده می‌شود (پتروشیمی، قند و شکر، روغن نباتی و ...)، شناختی نسبی از مسائل خم‌کاری لوله‌ها به‌دست آمده بود، ولی بروز حوادثی مشابه در محل خم‌ها در سوپرهایترهای یک بویلر بزرگ نیروگاهی در سال ۱۳۹۱ توجه را بیش از پیش به اهمیت این موضوع جلب کرد. لوله‌های سوپرهایتر نهایی این بویلر از یک شرکت خارجی خریداری شده و فرایندهای خم‌کاری لوله‌ها توسط یک شرکت دیگر خارجی انجام گرفت. پس از گذشت مدت کوتاهی از بهره‌برداری (در حدود یک تا دو ماه) شکست لوله‌ها از محل خم‌های لاشکل شروع شد. شکست از محل خم علاوه بر هزینه‌های گزاف تعویض و تعمیر، قابلیت تولید این واحد را به‌شدت کاهش داد و در ادامه با افزایش دفعات شکست و به‌تبع آن افزایش هزینه‌های تعویض این خم‌ها، مسئولان نیروگاه تصمیم به بریدن و تعویض همه خم‌های لاشکل گرفتند.

پیشامدهای مشابه کمابیش در دیگر نیروگاه‌ها نیز در محل خم‌ها روی می‌داد که این موضوع توجه بیشتر کارشناسان تعمیرات نیروگاه و به‌ویژه مهندسان ناظر بر عملیات خم‌کاری و تحویل‌گیری لوله‌ها را جلب کرد. بنابراین، برطرف کردن چنین نقصی، آشنایی با کیفیت خم‌کاری، شناخت روش‌ها و مراحل خم‌کاری، استانداردهای مربوط به کنترل کیفیت لوله‌ها و دیگر مسائل مرتبط را می‌طلبد.

مبحث خم‌کاری لوله‌ها با توجه به نکته‌های دقیقی که باید در فرایندهای خم‌کاری رعایت شود به موضوعی تخصصی، علمی و مهارتی در صنعت تبدیل شده است، به‌نحوی که اشراف

کامل مهندس ناظر بر تنوع لوله‌ها از نظر جنس و ابعاد، روش‌ها و استانداردهای خم‌کاری و کنترل کیفیت آنها الزامی است.

اهمیت و ریزه‌کاری موجود در فرایندهای خم‌کاری لوله‌ها مؤلفان را بر آن داشت تا حتی‌الامکان اطلاعات لازم برای انجام دادن این فرایند بااهمیت را در کتاب پیش‌رو در اختیار صنایع کشور قرار دهند. این کتاب در پنج فصل به شرح زیر ساماندهی شده است:

فصل اول: بویلرهای نیروگاهی، جنس و ابعاد لوله‌های آنها؛

فصل دوم: روش‌های تولید و خم‌کاری لوله‌ها؛

فصل سوم: عیوب ایجادشده هنگام خم‌کاری؛

فصل چهارم: استانداردهای خم‌کاری و بازرسی لوله‌ها؛

فصل پنجم: فرایندهای تأمین کالا (لوله‌ها).

در تألیف و تدوین این کتاب عزیزان بسیاری مشارکت و همکاری کرده‌اند که مدیون یاری همه آنها هستیم. ولی در این میان تلاش چشمگیر و ارزشمند دانشجویان محترم آقایان علی کهبانی، پیمان شورشی، حامد رضانی و سرکار خانم فهیمه محمودی بارزتر است. همکاران بزرگوار آقایان مهندس سهیل حاجی‌ابراهیمی (نیروگاه بندرعباس) و مهندس احمدحسین آصفی (نیروگاه زرگان) در ویرایش محتوایی و زبانی این کتاب کمک شایانی کرده‌اند که بدون مشارکت و مشاوره‌های ارزشمند آنان به‌طور قطع این کتاب جامعیت مطلوب را نداشت.

امید است این کتاب مورد استفاده مهندسان دفاتر فنی، تعمیرات و نظارت بر خم‌کاری لوله‌های بویلر در صنایع گوناگون شامل پتروشیمی، قند و شکر، روغن نباتی، صنایع غذایی، نساجی و دیگر صنایع، به‌ویژه بویلرهای نیروگاهی، قرار گیرد.

در پایان از همه استادان گرامی، مهندسان صنایع و به‌ویژه نیروگاه‌ها که این کتاب را مطالعه خواهند کرد صمیمانه درخواست می‌شود بر مؤلفان منت گذارند و نواقص و اشکال‌های احتمالی را اطلاع دهند تا در چاپ‌های بعدی تصحیح شود.

تو خشنود باشی و ما رستگار

خدایا چنان کن سرانجام کار

سید ابراهیم موسوی ترشیزی

محمد عابدی

۱۳۹۵

فصل ۱

بویلرهای نیروگاهی، جنس و ابعاد لوله‌های آنها

۱.۱. مقدمه

در یک نیروگاه حرارتی با انرژی موجود در سوخت و تبدیل انرژی شیمیایی حاصل از احتراق آن به انرژی مکانیکی و در نهایت انرژی الکتریکی، برق تولید می‌شود. از مهم‌ترین قسمت‌های یک نیروگاه می‌توان به بویلر (دیگ بخار) آن اشاره کرد. با احتراق سوخت و گرمای ناشی از آن، آب در بویلر به بخار خشک تبدیل شده و توربین را می‌چرخاند. مراحل تبدیل آب به بخار و بخار به بخار خشک در قسمت‌های مختلف بویلر انجام می‌شود. انرژی حاصل از احتراق آن با تشعشع و جابه‌جایی در کوره و هدایت آن به دیواره لوله‌ها به آب منتقل می‌شود. در این فصل انواع بویلرها و نیز اندازه و جنس لوله‌های مورد استفاده در آن بررسی خواهد شد.

۲.۱. بویلر و تجهیزات آن

۱.۲.۱. اهمیت بویلر در نیروگاه

بویلر یکی از با اهمیت‌ترین و در ضمن آسیب‌پذیرترین قسمت‌های یک نیروگاه است که وظیفه تبدیل انرژی شیمیایی سوخت به انرژی حرارتی و انتقال این انرژی به سیال عامل را دارد. براساس قانون اول ترمودینامیک، برای تولید کار به یک منبع حرارتی نیاز است که گرمای مورد نیاز چرخه را تأمین کند. همچنین با توجه به قانون دوم ترمودینامیک، فرایندها فقط در یک جهت معین پیش می‌رود و انجام دادن آن‌ها در خلاف جهت ممکن نیست. به عبارتی می‌توان گفت که همواره انتقال حرارت از منبع گرم به طرف منبع سرد است.

نیروگاه را می‌توان یک موتور حرارتی در نظر گرفت که در آن مقدار حرارت Q_H در بویلر از

۱. در زبان انگلیسی لوله و تیوب با یکدیگر تفاوت دارند، اما در سرتاسر این کتاب به منظور کاربرد واژه‌های فارسی، لوله و تیوب معادل یکدیگر به کار رفته است.