

گزارش فنی فولادهای مورد استفاده در لوله‌های بویلر و آسیب‌های وارده به آنها



مدیر پروژه: حسن کاظم‌پور

واحد مجری: طرح توسعه ارزیابی و افزایش عمر قطعات و اجزای نیروگاهی



روش‌های افزایش عمر لوله‌های بویلرهای نیروگاهی

مدیر پروژه: حسن کاظم‌پور

گروه پژوهشی پشتیبان: گروه پژوهشی متالورژی

همکاران پروژه: دکتر مهرداد آقای، دکتر محمد هادی شیخ انصاری و مهندس علی جعفری.

واحد مجری: طرح توسعه ارزیابی و افزایش عمر قطعات و اجزای نیروگاهی

انتشارات پژوهشگاه نیرو

آبان ۱۳۹۷

کد ثبت گزارش: NRI-ER-996-PIOPPN01-2-00-L

DOI: 10.30503/nripress.2020.280

ایران، وزارت نیرو، پژوهشگاه نیرو. طرح توسعه ارزیابی و افزایش عمر قطعات و تجهیزات نیروگاهی پروژه بررسی روشهای افزایش عمر لوله‌های بویلرهای نیروگاهی
روش‌های افزایش عمر لوله‌های بویلرهای نیروگاهی / مدیر پروژه: کاظم‌پور، حسن. کارفرما: پژوهشگاه نیرو، آبان ۱۳۹۷.
۷۷ ص: مصور، نمودار، جدول

۱. مهرداد آقایی، محمد هادی شیخ انصاری، علی جعفری، همکار پروژه. ۲. محسن مهدیزاده، مدیر واحد مجری.
۳. متالورژی. ۴. توسعه روش‌های ارزیابی وضعیت، تخمین عمر و پایش قطعات و تجهیزات فلزی.



انتشارات پژوهشگاه نیرو

طرح توسعه ارزیابی و افزایش عمر قطعات و تجهیزات نیروگاهی

کلیه حقوق معنوی اثر متعلق به پدیدآورندگان، کلیه حقوق مادی متعلق به پژوهشگاه نیرو و نشر مطالب در حدود متعارف، با ذکر منبع بلامانع است.

نشانی: تهران، شهرک غرب، انتهای بلوار شهید دادمان، پژوهشگاه نیرو، کدپستی: ۱۴۶۸۶۱۳۱۱۳

تلفن: ۸۸۰۷۹۴۰۱-۹

نمابر: ۸۸۰۷۸۲۹۶

وبگاه: www.nri.ac.ir

پست الکترونیک انتشارات: publications@nri.ac.ir

فرم تعهدنامه اصالت اثر

متعهد می‌شوم که مطالب مندرج در این گزارش حاصل کار پژوهشی اینجانب حسن کاظم‌پور، مدیر پروژه بررسی روش‌های افزایش عمر لوله‌های بویلرهای نیروگاهی و همکاران به شرح زیر است و دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این پژوهش از آن‌ها استفاده شده است مطابق مقررات، مورد ارجاع قرار گرفته و در فهرست منابع ذکر گردیده است.

□ گزارش حاصل انجام همه مراحل پروژه است.

■ گزارش حاصل انجام مرحله اول از ۴ مرحله پروژه است.

همکاران:

۱. مهرداد آقایی
۲. محمد هادی شیخ انصاری
۳. علی جعفری

فهرست مطالب

۱	مقدمه
۴	فصل اول: مروری اجمالی بر عملکرد بویلرها
۵	۱-۱) مقدمه
۵	۱-۲) اصول تولید بخار در بویلرها
۹	۱-۳) اجزای بویلر
۹	۱-۳-۱) کوره
۱۰	۱-۳-۲) لوله‌های واتروال
۱۰	۱-۳-۳) سوپرهیتر
۱۲	۱-۳-۴) ری‌هیتر
۱۲	۱-۳-۵) اکونومایزر
۱۴	۱-۳-۶) درام
۱۵	۱-۴) نیروگاه‌های ایران
۱۹	فصل دوم: مروری اجمالی بر انواع فولادهای بویلر
۲۰	۲-۱) مقدمه
۲۱	۲-۲) متالورژی فولادهای فریتی کم آلیاژ
۲۳	۲-۳) فولادهای زنگ نزن آستنیتی
۲۷	۲-۴) متالورژی فولادهای مارتنزیتی
۳۲	۲-۴-۱) تاثیر عناصر آلیاژی بر خواص فولادهای مارتنزیتی
۳۴	۲-۵) مقاومت به اکسیداسیون فولادهای پر کروم
۳۸	فصل سوم: مروری اجمالی بر آسیب‌های بویلر
۳۹	۳-۱) مقدمه
۳۹	۳-۲) گسیختگی تنش‌ی
۴۱	۳-۲-۱) خزش (اورهیت بلند مدت)

۴۵	۳-۳) رفتگی
۴۷	۳-۴) ایجاد ترک خوردگی-تنشی
۴۹	۳-۵) آسیب هیدروژنی
۵۱	۳-۶) خوردگی دمای پائین یا خوردگی انتهای سرد تجهیزات بویلر
۵۲	۳-۷) آسیب خستگی-خوردگی
۵۶	۳-۸) آسیب‌های جوشکاری
۵۷	۳-۸-۱) حساس شدن
۵۸	۳-۸-۲) ایجاد ترک خوردگی-تنشی
۵۸	۳-۸-۳) ترک خوردن
۵۹	۳-۸-۴) ترک ناشی از انجماد
۶۰	نتیجه‌گیری
۶۴	مراجع

فهرست شکل‌ها

- شکل (۱-۱) یک کتری بخار ساده ۶
- شکل (۲-۱) فرآیند تبخیر در لوله‌ها ۷
- شکل (۳-۱) شماتیکی از اجزای یک بویلر فوق بحرانی ۸
- شکل (۴-۱) نمونه‌ای از بویلرهایی که در فشار فوق بحرانی کار می‌کنند. ۹
- شکل (۵-۱) چگونگی نصب سوپرهیتر در یک بویلر با سوخت زغال سنگ ۱۱
- شکل (۶-۱) نمایی از یک اکونومایزر ۱۳
- شکل (۷-۱) نمونه‌ای از درام به کار رفته در بویلر ۱۴
- شکل (۱-۲) روند توسعه فولادهای فریتی در بویلرها ۲۳
- شکل (۲-۲) ترک خورگی-تنشی ۲۵
- شکل (۳-۲) روند توسعه فولادهای آستنیتی لوله‌های بویلر ۲۶
- شکل (۴-۲) (a) و (b) تصاویر TEM از مارتنزیت تمپر شده در فولاد 9Cr3W3CoVNb، (c) و (d) ۲۸
شماتیک ریزساختار مارتنزیت تمپر شده
- شکل (۵-۲) استحکام شکست خزشی ۱۰۰ هزار ساعت در ۶۰۰ و ۶۵۰°C برای فولادهای مارتنزیتی با ۹ ۳۱
درصد کروم
- شکل (۶-۲) مقایسه مقاومت خزشی فولادهای مختلف ۳۱
- شکل (۷-۲) نمونه‌ای از ترک نوع IV در منطقه ریزدانه HAZ فولاد P91 ۳۲
- شکل (۸-۲) برنامه توسعه فولادهای مارتنزیتی را در کشور ژاپن ۳۴
- شکل (۹-۲) میکروساختار لایه اکسیدی تشکیل شده در فولاد P91 ۳۶
- شکل (۱۰-۲) تغییرات جرمی فولادهای کرم دار در هوا بر حسب زمان ۳۶
- شکل (۱-۳) انواع آسیب‌ها در مناطق مختلف بویلر ۴۰
- شکل (۲-۳) نمونه‌ای از آسیب وارد شده در شرایط اورهیت کوتاه مدت ۴۰
- شکل (۳-۳) ایجاد شدن ترک در لیگامنتهای هدر سوپرهیتر ۴۳
- شکل (۴-۳) نمونه‌ای از شکست طولی مربوط به خزش دما بالا ۴۳
- شکل (۵-۳) نمونه‌ای از آسیب خزشی به شکل دهان ماهی ۴۴
- شکل (۶-۳) مثال‌هایی از آسیب رفتگی در لوله‌های بویلر: (a) ناحیه اطراف بست‌های سرامیکی، (b) ۴۶
منطقه میانی در پوشش‌های اسپر حرارتی، (c) آسیب ناشی از رفتگی دیواره و (d) آسیب در لوله سوپرهیتر
- شکل (۷-۳) تصویر از (A) ترک شاخه‌دار شده در سطح خارجی و (B) ترک در حالتی که نمونه اچ نشده ۴۷
است
- شکل (۸-۳) تصویر میکروسکوپ نوری از سطح خارجی لوله حاوی ترک‌های بین‌دانه‌ای ۴۸
- شکل (۹-۳) تصویر (a) شکل شماتیک لوله آب بویلر را به همراه منطقه آسیب نشان می‌دهد و (b) تصویر ۴۸
ماکرو از لوله آب بویلر که منطقه ترک را در لوله نشان می‌دهد

- شکل ۳-۱۰) تعیین تنش‌های باقیمانده ناشی از خمش لوله با استفاده از روش المان محدود ۴۹
- شکل ۳-۱۱) آسیب هیدروژنی به صورت شکاف پنجره ای و پارگی دیواره ۵۰
- شکل ۳-۱۲) شماتیک فرآیند خوردگی دما پایین ۵۱
- شکل ۳-۱۳) شروع فرآیند ایجاد شدن ترک خستگی-خوردگی ۵۳
- شکل ۳-۱۴) انتشار ترک خستگی-خوردگی ۵۴
- شکل ۳-۱۵) مراحل ایجاد ترک خستگی-خوردگی در (a) دما پایین و (b) دما بالا ۵۵
- شکل ۳-۱۶) نمودار مربوط به عمر خستگی-خوردگی بر حسب دما در آلیاژ ۳۱۶L ۵۶
- شکل ۳-۱۷) حساس شدن در منطقه HAZ ۵۸

فهرست جداول

۱۵	جدول ۱-۱) نیروگاه های سیکل ترکیبی و حرارتی ایران
۲۴	جدول ۱-۲) مقایسه فولادهای آستنیتی و فریتی
۴۵	جدول ۱-۳) برخی مثال ها در مورد آسیب رفتگی اجزای نیروگاه بخار

پیش‌گفتار

امروزه تولید انرژی با راندمان بالاتر و کم کردن اثرات مخرب محیطی بر روی تجهیزاتی که برای این منظور به کار می‌رود، از دغدغه‌های جدی صنعت محسوب می‌شود. در کنار این افزایش راندمان و ظرفیت تولید، باید به این نکته توجه داشت که عمر بسیاری از تجهیزات نیروگاه‌ها به عمر پیش‌بینی (طراحی) خود نزدیک می‌شود. در ایران، تعداد نیروگاه‌هایی که عمر آن‌ها به بیش از ۳۰ سال می‌رسد، در حال افزایش است. این موضوع در حالی است که نیاز کشور به تولید انرژی روندی صعودی را نشان می‌دهد. ساخت و تعویض تجهیزات نیروگاهی و نیز افزایش عمر تجهیزات فعلی، دو راهکار عمده در جهت رفع این مسئله محسوب می‌شوند. طراحی و ساخت تجهیزات جدید نیروگاهی به لحاظ اقتصادی پرهزینه است. از این رو، راهکار دوم که مبتنی بر افزایش عمر تجهیزات نیروگاهی است، مورد توجه مدیران صنایع تولید انرژی قرار گرفته است. از طرف دیگر، طبق آمار تفصیلی صنعت برق ایران (در سال ۱۳۹۵)، بیش‌تر انرژی (برق) تولید شده در کشور توسط نیروگاه‌ها (بویلرهای) بخار و سیکل ترکیبی تامین شده است.

اساس کار این بویلرها بر فرآیند تولید بخار در شبکه‌ای از لوله‌ها و انتقال آن به توربین استوار است. از این رو، ارائه روش‌هایی عملی به منظور افزایش عمر لوله‌های بویلر در قسمت‌هایی مانند سوپرهیتر، ری‌هیتر، واتروال و اکونومایزر یک ضرورت جدی محسوب می‌شود. برای این منظور ابتدا لازم است تا ضمن شناخت کلی نسبت به عملکرد بویلر و تجهیزات استفاده شده در آن، متالورژی فولادهای به کار رفته در لوله‌های بویلر و نیز عوامل تخریب این فولادها به دقت مورد مطالعه قرار گیرد.

در گزارش حاضر (گزارش فاز یک)، سعی شده تا موارد مطرح شده در بالا به صورت تفصیلی مورد بحث قرار گیرند. در فصل اول این گزارش، ابتدا به نحوه عملکرد بویلرها و اجزای مهم تشکیل دهنده آن اشاره شده است. در انتهای این فصل نیز، به نیروگاه‌های حرارتی کشور همراه عمر آن‌ها اشاره شده است. فصل دوم به انواع فولادهای به کار رفته در لوله‌های بویلر و مقایسه آن‌ها به لحاظ متالورژیکی می‌پردازد. در این فصل تلاش شده تا بیشتر به تحقیقات اخیر در زمینه فولادهای جدید پرداخته شود. در فصل سوم نیز مهمترین آسیب‌های

وارد به لوله‌های بویلر مورد بررسی قرار گرفته است. تلاش اصلی در این فصل بر روی به روز رساندن منابع موجود در این زمینه معطوف بوده است.

در فاز بعدی این پروژه سعی می‌شود تا روش‌های تمدید عمر لوله‌های بویلر شناسایی و به صورت تفصیلی مورد مطالعه قرار گیرند. از آنجایی که نتیجه‌گیری در خصوص امکان‌پذیر بودن افزایش عمر لوله‌های بویلر (خصوصاً در کشور) مستلزم بررسی و شناخت کلی نسبت ابعاد فنی و اقتصادی روش‌های تمدید عمر است، بخش امکان‌سنجی مربوطه در گزارش بعد ارائه خواهد شد.

لازم به ذکر است که همکاران طرح در نگارش این گزارش آقایان دکتر شیخ انصاری و مهندس جعفری می‌باشند.

فصل اول

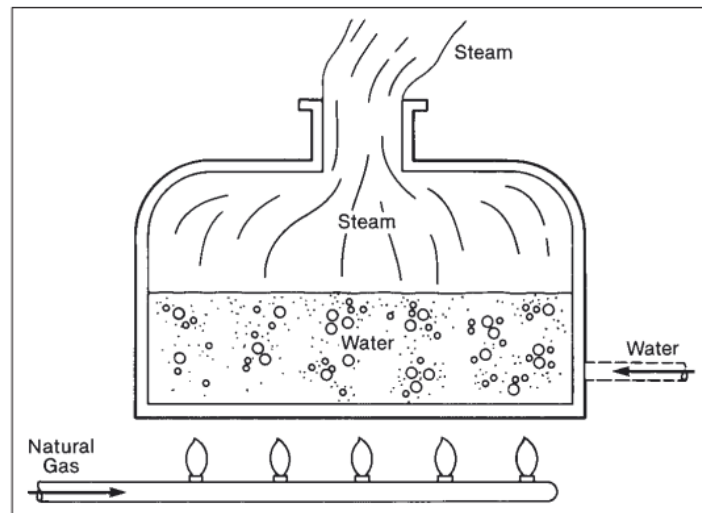
مروری اجمالی بر عملکرد بویلرها

به طور ساده می‌توان عملکرد یک بویلر را به صورت تبخیر آب در لوله‌های بویلر و استفاده از این بخار جهت چرخش پره‌های توربین بیان نمود. از ساخت اولین نمونه بویلرها تاکنون، پیشرفت‌های زیادی در زمینه طراحی و ساخت بویلرها صورت پذیرفته است. امروزه بویلرها جهت رسیدن به بیشترین بازدهی ممکن، جنبه‌های فنی بسیاری پیدا کرده‌اند و بخش‌های مختلفی را از جمله سوپرهیتر، ری‌هیتر و اکونومایزر را شامل می‌شوند. در این فصل ابتدا توضیحاتی در خصوص اصول پایه‌ای عملکرد یک بویلر ارائه می‌شود. در ادامه به انواع مختلف بویلر و بخش‌های مهم سازنده آن اشاره خواهد شد.

۲-۱) اصول تولید بخار در بویلرها

اساس کار این بویلرها بر گرم کردن آب تا حالت بخار است. در مرحله بعد، بخارهای تولید شده توربین‌های تولیدکننده الکتریسیته نیروگاه را به حرکت در می‌آورند. در این نیروگاه‌ها سوختن سوخت‌های فسیلی مثل نفت و گاز طبیعی و مازوت، حرارتی را تولید می‌کنند که توسط آن آب درون دیگ بخار به بخار خشک تبدیل می‌شود. بخار خشک بخاری هست که کاملاً به صورت گاز بوده و هیچ گونه قطره آبی در آن نباشد و دمای آن بالای ۵۰۰ درجه سانتی گراد باشد. این بخار خشک وارد توربین‌ها می‌شود و روتور توربین‌ها را به چرخش در می‌آورد. در اثر چرخش محور توربین‌ها، ژنراتور شروع به چرخش می‌کند و برق تولید می‌شود.

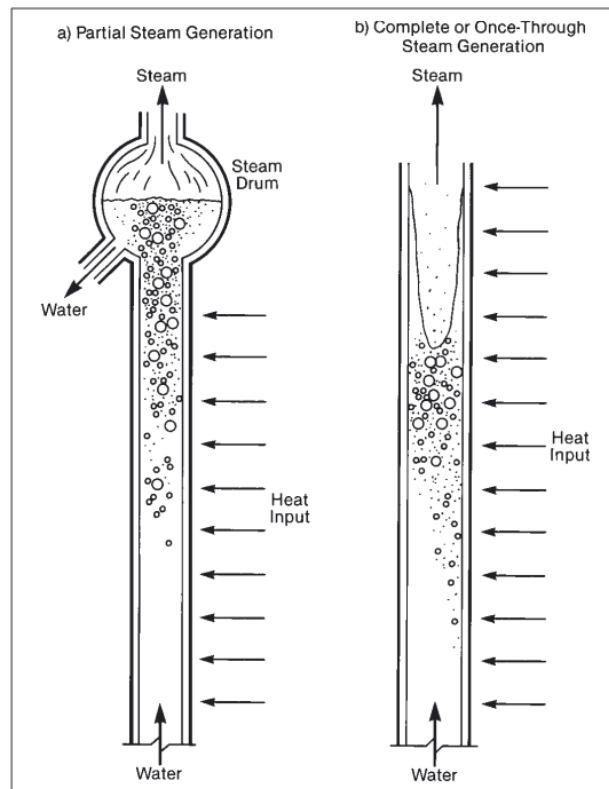
فرآیند تبدیل آب به بخار، فرآیندی شناخته شده ست. به لحاظ ترمودینامیکی، فارغ از افزایش دمای آب، برای تبدیل فاز از مایع به گاز (آب به بخار) انرژی لازم است. یک مولد بخار (بویلر) باید شرایطی را فراهم کند که این کار به طور پیوسته انجام شود. شکل (۱) ساده‌ترین سیستم مورد نیاز برای جوش آوردن آب را نشان می‌دهد. در این سیستم، مقدار مشخصی از آب در معرض حرارت قرار می‌گیرد.



شکل ۱-۱) یک سیستم ساده برای ایجاد بخار [۱]

گرمای اعمال شده سبب افزایش دمای آب می‌شود. در یک فشار ثابت، بعد از مدتی آب به دمای جوش (اشباع) می‌رسد و حباب‌ها تشکیل می‌شوند. با ادامه حرارت دادن، دما ثابت می‌ماند و در عین حال بخار از سطح مایع خارج می‌شود. اگر بخار به صورت پیوسته خارج شود، دما همچنان ثابت باقی می‌ماند تا اینکه تمامی آب تبخیر شود. در نتیجه برای اینکه فرآیند تولید بخار به صورت پیوسته ادامه یابد، لازم است تا به همان میزان که بخار تولید می‌شود، آب به سیستم تزریق شود.

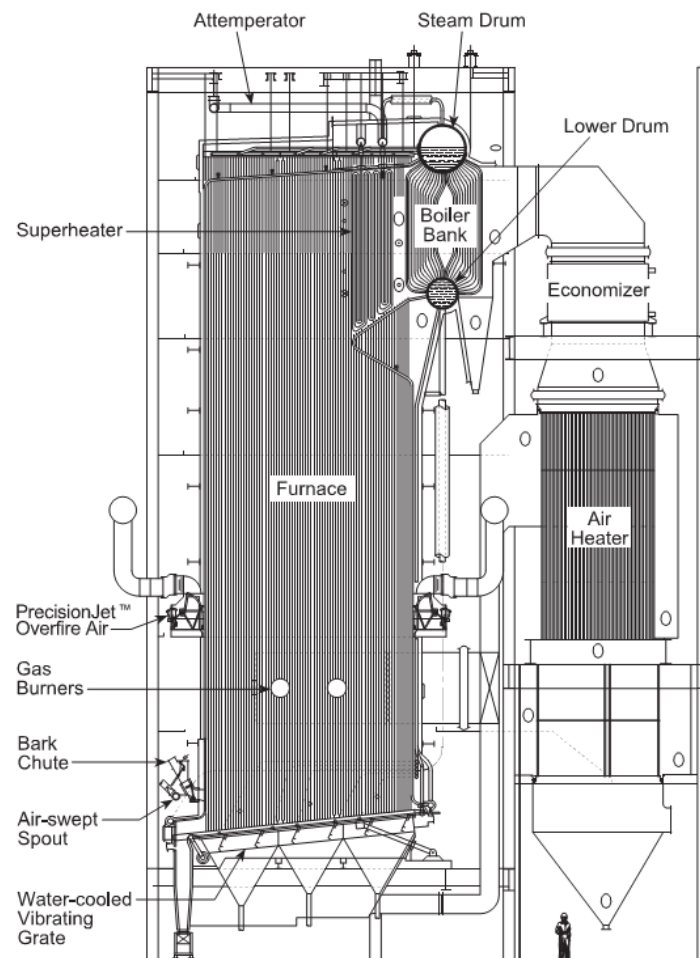
بررسی‌های فنی نشان می‌دهد که پربازده‌ترین روش جهت تولید بخاری با فشار بالا، حرارت دادن لوله‌هایی با قطر کم است که آب درون آن‌ها به طور پیوسته جریان دارد. فارغ از منبع تولید انرژی که می‌تواند فسیلی یا هسته‌ای باشد، دو سیستم برای این منظور وجود دارد: بویلرهایی که از درام‌ها استفاده می‌کنند (شکل ۱-a) (۲)، و آن‌هایی که فاقد درام هستند (شکل ۱-۲b) [۱].



شکل ۱-۲) فرآیند تبخیر در لوله‌ها، (a) با درام و (b) بدون درام [۱]

در یک نیروگاه بخار مدرن، انواع اجزاء در راستای بهینه‌سازی جذب حرارت از محصولات احتراقی در جاهای مناسب خود قرار گرفته‌اند. این اجزاء شامل بدنه بویلر، سوپرهیتر، ری‌هیتر، اکونومایزر و گرم‌کننده هواست. علاوه بر این اجزاء، سیستم‌هایی جهت جدایش سیستم بخار و آب و نیز کنترل دمای بخار خروجی وجود دارد. بخش تولید کننده بخار خود به دو قسمت کوره و جریان همرفتی تقسیم می‌شود.

قسمت جریان همرفتی شامل مجموعه‌ای از لوله‌هاست که خود به قسمت‌های سوپرهیتر، ری‌هیتر، لوله‌های بانک (Boiler bank) و اکونومایزر تقسیم می‌شود. شکل ۱-۳، شماتیکی از یک بویلر فوق بحرانی را نشان می‌دهد [۲].

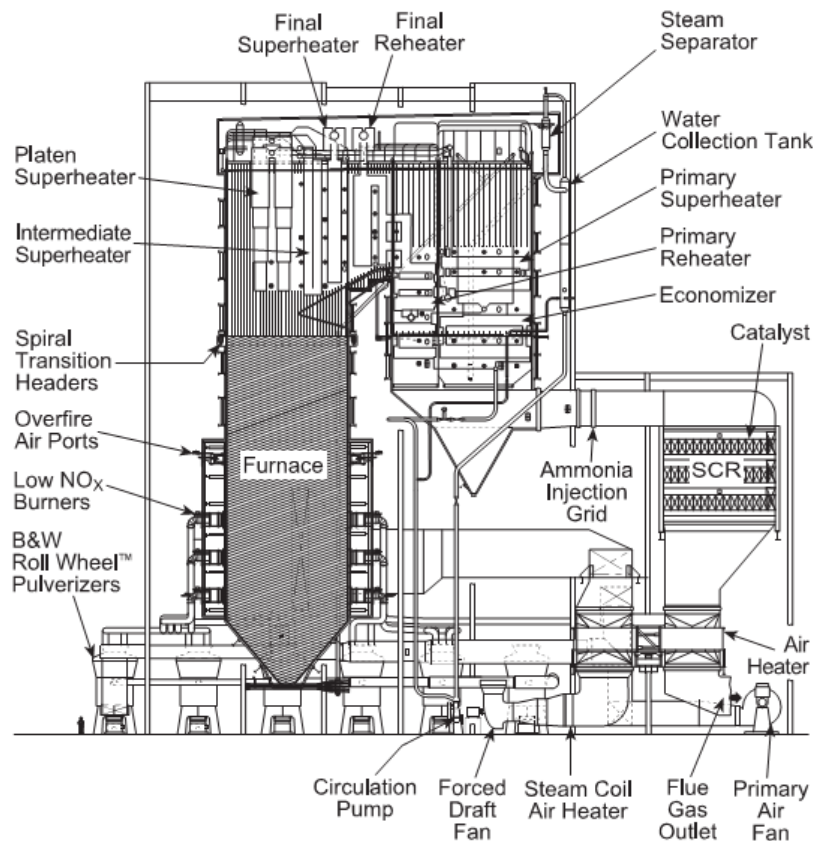


شکل ۳-۱ شماتیکی از اجزای یک بویلر فوق بحرانی [۲]

بویلرها می‌توانند به دو حالت فشار زیربحرانی و فوق‌بحرانی طراحی شوند. در فشارهای زیربحرانی، چرخه حرارتی باید به گونه‌ای طراحی شود که حالت دوفازی آب-بخار به وجود بیاید. در بویلرهای فوق بحرانی، دمای مایع تک فاز با عبور از بویلر به طور پیوسته افزایش می‌یابد. در هر دوی این طراحی‌ها باید به این نکته توجه کرد که عدم تعادلی در دماهای فلز لوله‌ها به وجود نیاید.

همچنین دو سیستم چرخش سیال را می‌توان در نظر گرفت. یکی سیستم چرخش طبیعی و دیگری Once-through است. در سیستم چرخش طبیعی، که در فشارهای زیربحرانی عمل می‌کند، بخشی از فاز سیال به بخار تبدیل می‌شود که مخلوط آب-بخار را در خروجی لوله‌ها ایجاد می‌کند. در اینجا به تجهیزات جداکننده بخار و آب نیاز است تا بخار به قسمت سوپرهیتر فرستاده شود و آب به چرخه بویلر باز گردد. سیستم چرخش

طبیعی در نتیجه تفاوت دانسیته سیال سردتر و چگال‌تر در قسمت‌های پایینی و سیال گرم‌تر و با چگالی پایین‌تر در مناطق بالایی بویلر حاصل می‌شود. در سیستم چرخش Once-through درام بخار و جداکننده بخار حذف شده است. فشارهای فوق بحرانی باعث افزایش بازدهی کل چرخه تولید توان می‌شوند. نمایی از این گونه بویلرها در شکل ۴-۱ آورده شده است [۲].



شکل ۴-۱) نمونه‌ای از بویلرهایی که در فشار فوق بحرانی کار می‌کنند

۱-۳) اجزای بویلر

۱-۳-۱) کوره

کوره یا اتاق احتراق، محفظه‌ای است که عمل احتراق سوخت در آن انجام می‌گیرد و باعث می‌شود تا انرژی حرارتی ایجاد شده توسط مکانیزم‌های تشعشع، جابجایی و هدایت به آب درون لوله‌ها انتقال یابد. حاصل این تبادل حرارت، جذب انرژی حرارتی توسط آب داخل لوله‌ها و تبدیل آن به بخار است. در نیروگاه‌های قدیمی

دیواره بویلرها معمولاً از آجر یا دیوارهایی که با سیال هوا خنک می‌شد، ساخته می‌شدند که این نوع از بویلرها، به سرعت در اثر افزایش درجه حرارت، خراب شده و از بین می‌رفتند. ساخت بویلرها به صورت واتر تیوب باعث گردید که آب تغذیه بویلر خود به عنوان سیستم خنک کن دیوارهای محفظه احتراق مورد استفاده قرار گیرد. لوله‌های آب در همه دیوارهای جانبی، کف و بالای اتاق احتراق قرار گرفته‌اند که با این طرح علاوه بر افزایش سطوح حرارتی، ساخت بویلرهای بزرگ امکان پذیر شده و مسائل مربوط به تعمیر و نگهداری آن نیز به حداقل رسیده است. در ضمن انتقال حرارت از لوله‌ها به آب درون آنها، نیز باعث خنک شدن دیواره کوره می‌شود.

۲-۳-۱) لوله‌های واتروال

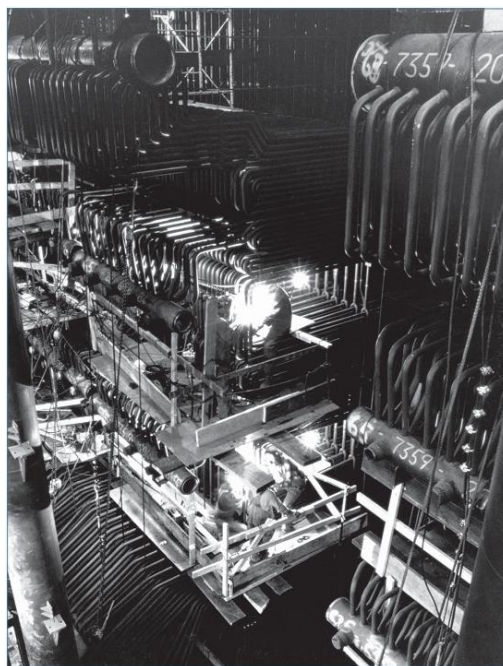
در بویلرها، تبدیل آب به بخار در لوله‌های واتروال انجام می‌شود. در این بویلرها معمولاً لوله‌ها عمودی و به صورت دیواره‌های یک پارچه هستند. آب درون لوله‌ها با جذب انرژی حرارتی، عمل خنک کاری دیواره‌ها را نیز انجام می‌دهد. بین لوله‌های دیواره‌ای، یک نوار فولادی که فین نام دارد قرار داده شده است این فین‌ها رابط بین لوله‌ها هستند که علاوه بر یک پارچه ساختن دیواره، نقش مؤثری از نظر تبادل حرارت ایفا می‌کنند. در نوع دیگری از دیواره‌ها، لوله‌های بکار رفته خود دارای فین هستند که با کنار هم قرار دادن و جوش دادن فین‌ها یک دیواره پیوسته به وجود می‌آید. نحوه چینش لوله‌ها بستگی به شرایط احتراق و اندازه بویلر دارد. عموماً ترتیب چینش لوله‌ها در بویلرهای مختلف در یک راستا، لوله‌ها با طرحی ساده نزدیک هم قرار گرفته‌اند، که به نام لوله‌های مماسی معروف هستند.

۳-۳-۱) سوپرهیتر

بخار خروجی از درام پس از عبور از خشک کن‌ها، با آن که بدون آب است ولی به دلیل اشباع بودن پس از برخورد با سطوح سرد قسمتی از آن به آب تبدیل می‌شود. وجود ذرات آب در بخار ورودی به توربین موجب خوردگی و یا سایش در پره‌های توربین می‌گردد. لذا بخار خروجی از درام برای این که انرژی بیشتری داشته

باشد و باعث بروز خوردگی در توربین نگردد، باید از حرارت بالاتری برخوردار باشد، که اصطلاحاً به آن بخار خشک یا سوپرهیت می گویند. این عمل در داخل سوپر هیترها که از لوله های موازی تشکیل شده و در مسیر گازهای داغ حاصل از احتراق قرار گرفته اند، انجام می گیرد.

بسته به نوع بویلر، سوپر هیترها به صورت یک یا چند مرحله ای طراحی می شوند. سوپر هیترها، اکثراً بالای محفظه احتراق قرار داشته و حرارت این منطقه را بیشتر به صورت تشعشع و مقداری هم به صورت جابجایی دریافت می کنند. قسمت دیگر از سوپرهیتر در منطقه کنوکسیون بویلر قرار دارد که حرارت به صورت جابجایی به آنها منتقل می شود. در سوپرهیترهای تشعشعی در اثر افزایش بار بویلر، حرارت افت می کند ولی در سوپر هیتراهای کنوکسیونی این فرایند برعکس می باشد. به هر حال سیستم کنترل دمای بخار سوپرهیت باید بتواند در پایین ترین و بالاترین مقدار بار بویلر، درجه حرارت لازم را ثابت نگه دارد. در طراحی سوپرهیترهای چند مرحله ای بخار ابتدا وارد سوپر هیتر اولیه شده و پس از خروج از آن توسط دی سوپرهیتر از نظر درجه حرارت کنترل شده و سپس وارد سوپرهیتر ثانویه گردیده و به سمت توربین هدایت می شود. در شکل ۵-۱، چگونگی نصب سوپرهیتر در یک بویلر با سوخت زغال سنگ نشان داده شده است [۲].



شکل ۵-۱) چگونگی نصب سوپرهیتر در یک بویلر با سوخت زغال سنگ [۲]

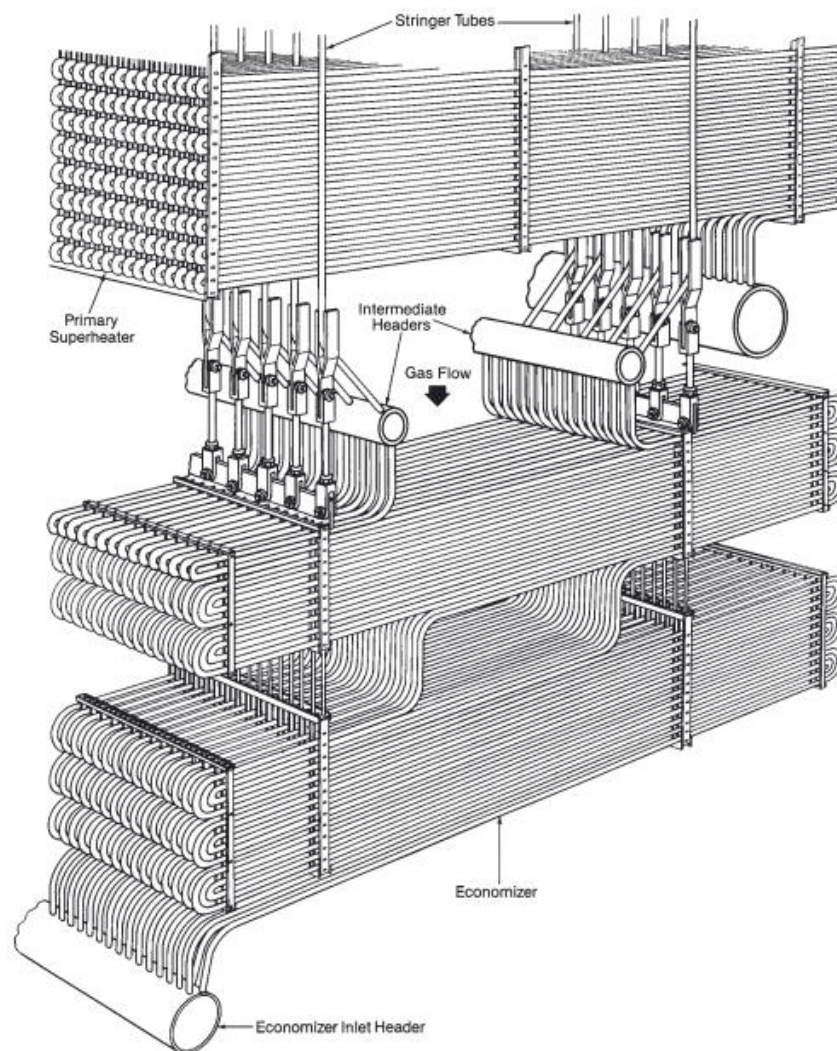
۴-۳-۱) ری هیتر

بخار خروجی از سوپرهیترهای نهایی وارد توربین فشارقوی شده و باعث چرخش پره های آن می شود. انرژی بخار، هنگام خروج از توربین فشار قوی به علت انجام کار، کاهش می یابد. جهت استفاده مجدد از این بخار در توربین فشار متوسط و فشار ضعیف و هم چنین برای حذف رطوبت احتمالی در آن، از ری هیتر استفاده می شود. ری هیترها می توانند ۴ تا ۵ درصد بازده سیکل را افزایش دهند. ری هیترها از لوله های افقی و موازی تشکیل شده اند. این لوله ها در مسیر محصولات احتراق قرار گرفته و حرارت گازهای داغ را به بخار داخل خود منتقل می کنند. وجود ری هیتر بستگی به ظرفیت بویلر و نوع طراحی نیروگاه دارد. در بویلرهای با ظرفیت کم معمولاً از ری هیتر استفاده نمی کنند. ولی در بویلرهای با ظرفیت بالا برای توزیع مناسب جریان بخار در توربین های فشار متوسط و ضعیف و نهایتاً افزایش راندمان حتماً از ری هیتر استفاده می شود. معمولاً ری هیترها به دو بخش اولیه و ثانویه و گاهی به چندین بخش تقسیم می شود، که در بویلرهای مدرن ری هیترها به طور مساوی با سوپرهیترها، به صورت مختلط و یا جداگانه در قسمت های بالای کوره قرار می گیرند. در ری هیتر، فشار بخار ثابت بوده ولی درجه حرارت بخار تا حد نامی آن افزایش می یابد [۲].

۵-۳-۱) اکونومایزر

گازهای داغ حاصل از محصولات احتراق پس از تبادل حرارت با سوپر هیترها و ری هیتر به سمت خروجی بویلر هدایت می شوند. محصولات احتراق خروجی هنوز دارای مقدار زیادی حرارت می باشند. اگر این مقدار حرارت باقیمانده از بویلر خارج شود، از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نبوده و باعث کاهش راندمان بویلر خواهد شد. برای جذب حرارت باقیمانده در محصولات احتراق، از اکونومایزر که جزء اساسی در طراحی بویلر است استفاده می کنند. در طراحی های اولیه برای صرفه جویی در سوخت، این قسمت را به بویلر اضافه می کردند، لذا از همان موقع به نام اکونومایزر یعنی اقتصادی کننده معروف گردید.

از جهتی اکونومايزر را می توان به عنوان هیتز آب تغذیه نیز به حساب آورد. اکونومايزر شامل تعدادی لوله های سری است که در آخرین مرحله مسیر گازهای حاصل از احتراق قرار گرفته است. لوله ها به طور دسته جمعی در چند مرحله توسط یک سری لوله های خمیده یا زانویی به هم متصل می باشند. لوله های خمیده را اصطلاحاً خم اکونومايزر می گویند. اکونومايزر آخرین مرحله ای است که آب کندانسیت خروجی از کندانسور در آن گرم شده و سپس وارد درام می شود. آب تغذیه نیز ابتدا به قسمت تحتانی یا سردترین بخش اکونومايزر وارد می شود و از لوله های آن گذشته و به قسمت بالا که گرم ترین قسمت است رسیده و سپس وارد هدر خروجی می گردد. در شکل ۶-۱، نمایی از یک اکونومايزر نشان داده شده است [۳].



شکل ۶-۱) نمایی از یک اکونومايزر [۳]

۶-۳-۱) درام

وظیفه درام جداسازی آب و بخار از یکدیگر می باشد. طراحی و اجزاء بکار رفته در درام نیروگاه های مختلف ممکن است متفاوت باشد ولی اساس کار آنها یکسان است. در کلیه این درام ها مخلوط آب و بخار داخل سیکلون شده و با حرکتی چرخشی که در سیکلون به آنها داده می شود، به دلیل نیروی گریز از مرکز ایجاد شده، قطرات آب به علت سنگینی وزن از بخار جدا می گردند. بخار پس از عبور از صفحات خشک کننده آخرین قطرات آب خود را نیز از دست داده و به سمت لوله های سوپرهیتر، هدایت می شود. آب بدون ذرات بخار، مجدداً توسط لوله های پایین آورنده به سمت لوله های دیواره ها هدایت می شود. وظیفه دیگر درام، عمل نمودن به عنوان یک مخزن ذخیره آب برای بویلر است. درام با ذخیره آب یا بخار در درون خود، در شرایط بحرانی بهره برداری از بویلر، می تواند تا حدی آب یا بخار مورد نیاز را تأمین نماید. در شکل ۷-۱، نمونه ای از درام به کار رفته در بویلرها نشان داده شده است [۴].



شکل ۷-۱) نمونه ای از درام به کار رفته در بویلر [۴]

۴-۱) نیروگاه‌های ایران

به طور کلی نیروگاه های ایران با سوخت فسیلی به سه دسته ی بخاری، گازی و سیکل ترکیبی تقسیم می‌شوند. از این سه دسته ی ذکر شده نیروگاه های گازی فاقد بویلر می باشند. در جدول زیر نیروگاه های حرارتی و سیکل ترکیبی ایران دسته‌بندی شده است. لازم به ذکر است که جدول ۱-۱ براساس گزارش تفصیلی صنعت برق ایران (در خصوص نام نیروگاه‌ها) و گزارش‌های موجود برای هر نیروگاه تنظیم شده است.

جدول ۱-۱) نیروگاه های سیکل ترکیبی و بخاری ایران

ردیف	نام	عمر نیروگاه (سال)	نوع نیروگاه	نوع سوخت	تعداد واحد گاز	تعداد واحد بخار
۱	نیروگاه دماوند	۱۰	سیکل ترکیبی	گاز طبیعی و گازوئیل	۱۲ واحد گازی ۱۵۹ مگاواتی	۶ واحد بخار ۱۶۰ مگاواتی
۲	نیروگاه شهید سلیمی نکا	۳۹	سیکل ترکیبی	گاز طبیعی و مازوت	۲ واحد گازی ۱۳۶ مگاواتی	۴ واحد بخار ۴۴۰ مگاواتی و ۱ واحد بخار ۱۶۰ مگاواتی
۳	نیروگاه شهید رجایی	۲۶	سیکل ترکیبی	گاز طبیعی و مازوت	۶ واحد گازی ۱۲۴ مگاواتی	۴ واحد بخار ۲۵۰ مگاواتی و ۳ واحد بخار ۱۰۰ مگاواتی
۴	نیروگاه سیکل ترکیبی کرمان	۱۷	سیکل ترکیبی	گاز طبیعی و گازوئیل	۸ واحد گازی ۱۵۹ مگاواتی	۴ واحد بخار ۱۶۰ مگاواتی
۵	نیروگاه رامین اهواز	۳۹	بخاری	گاز طبیعی و مازوت		۶ واحد بخار ۳۱۵ مگاواتی
۶	نیروگاه شهید منتظری	۳۴	بخاری	مازوت و گاز طبیعی		۸ واحد بخار ۲۰۰ مگاواتی
۷	نیروگاه سیکل ترکیبی خرمشهر	در دست احداث	سیکل ترکیبی	-	-	-
۸	نیروگاه سیکل ترکیبی شیروان	در دست احداث	سیکل ترکیبی	-	-	-

۹	نیروگاه سیکل ترکیبی ارومیه	در دست احداث	سیکل ترکیبی	-	-	-
۱۰	نیروگاه سیکل ترکیبی جهرم	در دست احداث	سیکل ترکیبی	-	-	-
۱۱	نیروگاه سیکل ترکیبی کازرون	۲۴	سیکل ترکیبی	گاز طبیعی و گازوئیل	۲ واحد گازی	۳ واحد بخار ۱۶۰ مگاواتی
۱۲	نیروگاه حرارتی بندرعباس	۳۸	بخاری و گازی	مازوت و گازوئیل و گاز طبیعی	۲ واحد گازی ۲۵ مگاواتی	۴ واحد بخار ۳۲۰ مگاواتی
۱۳	نیروگاه سیکل ترکیبی گیلان	۲۶	سیکل ترکیبی		۶ واحد گازی ۱۴۳ مگاواتی	۳ واحد بخار ۱۴۸ مگاواتی
۱۴	نیروگاه شازند	۱۷	بخاری	گاز طبیعی و مازوت	-	۲ واحد بخار ۳۲۵ مگاواتی
۱۵	نیروگاه بیستون	۲۴	بخاری	گاز طبیعی و مازوت	-	۲ واحد بخار ۳۲۰ مگاواتی
۱۶	نیروگاه نیشابور	۲۵	سیکل ترکیبی	گاز طبیعی و گازوئیل	۶ واحد گازی ۱۲۴ مگاواتی	۳ واحد بخار ۱۲۴ مگاواتی
۱۷	نیروگاه فارس	۱۶	سیکل ترکیبی		۶ واحد گازی ۱۲۴ مگاواتی	۳ واحد بخار ۹۸ مگاواتی
۱۸	نیروگاه شهید مفتاح	۲۲	بخاری	گاز طبیعی و مازوت	-	۴ واحد بخار ۲۵۰ مگاواتی
۱۹	نیروگاه سیکل ترکیبی بهبهان	در دست احداث	سیکل ترکیبی	-	-	-
۲۰	نیروگاه علی آباد کتول	در دست احداث	سیکل ترکیبی	-	-	-
۲۱	نیروگاه پره‌سر	۷	سیکل ترکیبی	گاز طبیعی و گازوئیل	۴ واحد گازی ۱۶۲ مگاواتی	۲ واحد بخار ۱۶۰ مگاواتی
۲۲	نیروگاه جنوب اهواز	۱۵	سیکل ترکیبی	گاز طبیعی و گازوئیل	۴ واحد گازی ۱۶۲ مگاواتی	۲ واحد بخار ۱۶۰ مگاواتی
۲۳	نیروگاه گنو	در دست احداث	سیکل ترکیبی	-	-	-

۲۴	نیروگاه قلبان سنندج	۱۵	سیکل ترکیبی	گاز طبیعی و گازوئیل	۴ واحد گازی ۱۵۹ مگاواتی	۲ واحد بخار ۱۶۰ مگاواتی
۲۵	نیروگاه سبلان	در دست احداث	سیکل ترکیبی	-	-	-
۲۶	نیروگاه اسلام آباد اصفهان	۴۹	بخاری		-	۵ واحد بخار (۲ واحد ۳۷,۵ مگاواتی، یک واحد ۱۲۰ مگاواتی و ۲ واحد ۳۲۰ مگاواتی)
۲۷	نیروگاه سیکل ترکیبی آبادان	۹	سیکل ترکیبی	گاز طبیعی و گازوئیل	۴ واحد گازی ۱۲۴ مگاواتی	۲ واحد بخار ۱۶۰ مگاواتی
۲۸	نیروگاه گازی و حرارتی تبریز	۲۹	بخاری و گازی	گاز طبیعی و مازوت	۲ واحد گازی ۳۲ مگاواتی	۲ واحد بخار ۳۶۸ مگاواتی
۲۹	نیروگاه سیکل ترکیبی ایرانشهر	۵	سیکل ترکیبی	گاز طبیعی و مازوت	۲ واحد گازی ۱۶۲ مگاواتی	۱ واحد بخار ۱۶۰ مگاواتی
۳۰	نیروگاه قم	۲۰	سیکل ترکیبی	گاز طبیعی و گازوئیل	۴ واحد گازی ۱۲۸ مگاواتی	۲ واحد بخار ۱۰۰ مگاواتی
۳۱	نیروگاه سهند	۱۵	بخاری	گاز طبیعی و مازوت	-	۲ واحد بخار ۳۲۵ مگاواتی
۳۲	نیروگاه طبس	در دست احداث	بخاری	-	-	-
۳۳	نیروگاه طوس	۳۳	بخاری	گاز طبیعی و گازوئیل	-	۴ واحد بخار ۱۵۰ مگاواتی
۳۴	نیروگاه شریعتی		سیکل ترکیبی		۶ واحد گازی ۲۵ مگاواتی و دو واحد گازی ۱۲۴ مگاواتی	یک واحد بخار ۱۰۰ مگاواتی

۳۵	نیروگاه زواره	۷	سیکل ترکیبی	گاز طبیعی و گازوئیل	۲ واحد گازی ۱۶۲ مگاواتی	۱ واحد بخار ۱۶۰ مگاواتی
۳۶	نیروگاه گناوه	۱۰	سیکل ترکیبی		۲ واحد گازی ۱۶۲ مگاواتی	۱ واحد بخار ۱۶۰ مگاواتی
۳۷	نیروگاه سیکل ترکیبی شیرکوه	۶	سیکل ترکیبی	گاز طبیعی و گازوئیل	۲ واحد گازی ۱۶۲ مگاواتی	۱ واحد بخار ۱۶۰ مگاواتی
۳۸	نیروگاه زرگان		بخاری و گازی		۴ واحد گازی ۳۲ مگاواتی	۲ واحد بخار ۱۴۵ مگاواتی
۳۹	نیروگاه مشهد	۵۵	بخاری و گازی		۴ واحد گازی ۶۰ مگاواتی	۲ واحد بخار ۳۴ مگاواتی
۴۰	نیروگاه شهید بهشتی لوشان	۴۶	بخاری و گازی		۲ واحد گازی ۶۰ مگاواتی	۲ واحد بخار ۱۲۰ مگاواتی
۴۱	نیروگاه سیکل ترکیبی خوی	۲۰	سیکل ترکیبی	گاز طبیعی و گازوئیل	۲ واحد گازی ۱۲۵ مگاواتی	۱ واحد بخار ۱۰۰ مگاواتی
۴۲	نیروگاه شهید منتظر قائم	۴۷	سیکل ترکیبی			
۴۳	نیروگاه حرارتی بعثت	۵۰	بخاری	گاز طبیعی و گازوئیل	-	۳ واحد بخار ۸۲ مگاواتی
۴۴	نیروگاه زرنند	۴۵	بخاری	مازوت	-	۲ واحد بخار ۳۰ مگاواتی

فصل دوم

مروری اجمالی بر انواع فولادهای بویلر

در طی نیم قرن اخیر، توان نیروگاه‌های بخار به طور چشمگیری افزایش یافته است. فشار بخار در نیروگاه‌ها تقریباً ۶ برابر شده و از طرف دیگر دمای بخار نیز از 450°C به 600°C افزایش یافته است. از این رو، در اوایل دهه ۱۹۸۰ تلاش‌هایی به منظور بهبود طراحی نیروگاه‌ها و همچنین تولید موادی مقاوم به دما و فشارهای بالا صورت پذیرفت. در اوایل دهه ۱۹۹۰، دمای بخار تولیدی در نیروگاه‌های جدید به 596°C و در سال ۲۰۰۰ به 600°C نیز افزایش پیدا کرد.

انواع مختلفی از تجهیزات بویلر که با لوله‌ها و هدرها در ارتباط هستند وجود دارد. تجهیزات (مخازن) تحت فشار که در دماهای نسبتاً پایین آب و بخار مورد استفاده قرار می‌گیرند و شامل موارد زیر می‌شوند:

- درام بخار برای بویلرهای سیکل طبیعی و تحت فشار (توسط پمپ)
- مخازن ترکیب و توزیع در بویلرهای سیکل ترکیبی (که ترکیبی از ویژگی‌های بویلرهای تحت فشار و یک مرحله‌ای^۱ محسوب می‌شوند)
- مخازن جداکننده آب و بخار

فولادهای کربنی ساده برای ساخت درام‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. با این حال برای ساخت جداکننده‌های آب-بخار (که از صفحات ضخیم ۵۰ تا ۱۷۰ میلی‌متری ساخته می‌شوند)، از فولادهای ۵Mo/۰ و SA-387 سری ۱۱ استفاده می‌شود. قسمت‌های تحت فشاری که در معرض بخار و نیز گاز احتراقی قرار دارند شامل اکونومایزرها، دیواره‌های کوره، سوپرهیتورها و ری‌هیتورها می‌شود. این تجهیزات از لوله‌های فولادی با قطر کم ساخته می‌شوند. در بویلرهایی که تا دمای 538°C کار می‌کنند، اغلب از فولادهای 1.25Cr0.5Mo (T11) و 2.25Cr1Mo (T22) استفاده می‌شود. همچنین تا مدتی فولاد 9Cr1Mo (T9) (که مقاومت به خوردگی عالی دارد) برای این منظور توسعه پیدا کرد. با این حال، عیب استفاده از فولاد T9 به حساسیت بسیار بالای این فولاد به ترک خوردن ناشی از جوشکاری باز می‌گردد. از این رو، کاربرد این فولاد بسیار محدود شده است. فولادهایی مانند 2.25Cr1.6W (T23)، 9Cr2Mo (STBA27)، 9Cr1MoVNb (T91)، 9Cr0.5Mo1.8W

¹ Once through

(T92)، 12Cr1Mo1W (HCM12) و 11Cr0.4Mo2W (T122) خواص جوش پذیری بهتری را نشان می دهند. از این رو، این فولادها به طور گسترده‌ای جایگزین فولاد T9 شده‌اند [۵].

استحکام فولادهای کم آلیاژ با ۹ درصد کروم جهت استفاده در بویلرهایی با دمای کاری بیش از 568°C کافی نیست. همچنین این فولادها در مناطق انتهایی سوپرهیتر و ری هیتر، مقاومت به خوردگی ضعیفی دارند. در نتیجه، فولادهای زنگ نزن 18Cr8Ni مانند TP304H و TP321H برای این منظور توسعه یافته‌اند. در ادامه به متالورژی فولادهای به کار رفته در بویلرها پرداخته می شود. لازم به ذکر است که فولادهای به کار رفته در بویلرها اغلب از نوع فولادهای زنگ نزن هستند [۶]. ساختار فولادهای زنگ نزن بر پایه پایداری فازهای فریت، آستنیت و مارتنزیت در ریزساختار است. عناصری مانند Cr، Mo، Si، Ti، Nb، V و Al پایدارکننده فریت و عناصری مانند Ni، Mn، C، N و Co و Cu پایدارکننده آستنیت هستند. با توجه به اثرگذاری این عناصر، فولادهای زنگ نزن به ۴ دسته فریتی، مارتنزیتی، آستنیتی و دوفازی تقسیم می شوند. لازم به ذکر است که در سال‌های اخیر توسعه فولادهای زنگ نزن دوفازی که عموماً متشکل از ۵۰٪ فریت و ۵۰٪ آستنیت هستند، توجه زیادی را به خود جلب نموده است. این فولادها در مقایسه با فولادهای فریتی، استحکام و مقاومت به خوردگی بسیار خوبی از خود نشان می دهند و از طرف دیگر در مقایسه با فولادهای آستنیتی، مقاومت بهتری نسبت به ایجاد ترک خوردگی-تنشی دارند. از این رو، کاربرد زیادی در صنایع نفت، گاز طبیعی و محصولات شیمیایی یافته‌اند. با این وجود، استفاده از آن‌ها محدود به دماهای زیر 250°C (برای سازه‌های جوشکاری شده) و زیر 300°C (برای سایر سازه‌ها) می شود تا از رسوب فازهای نامطلوب جلوگیری شود [۶].

۲-۲) متالورژی فولادهای فریتی کم آلیاژ

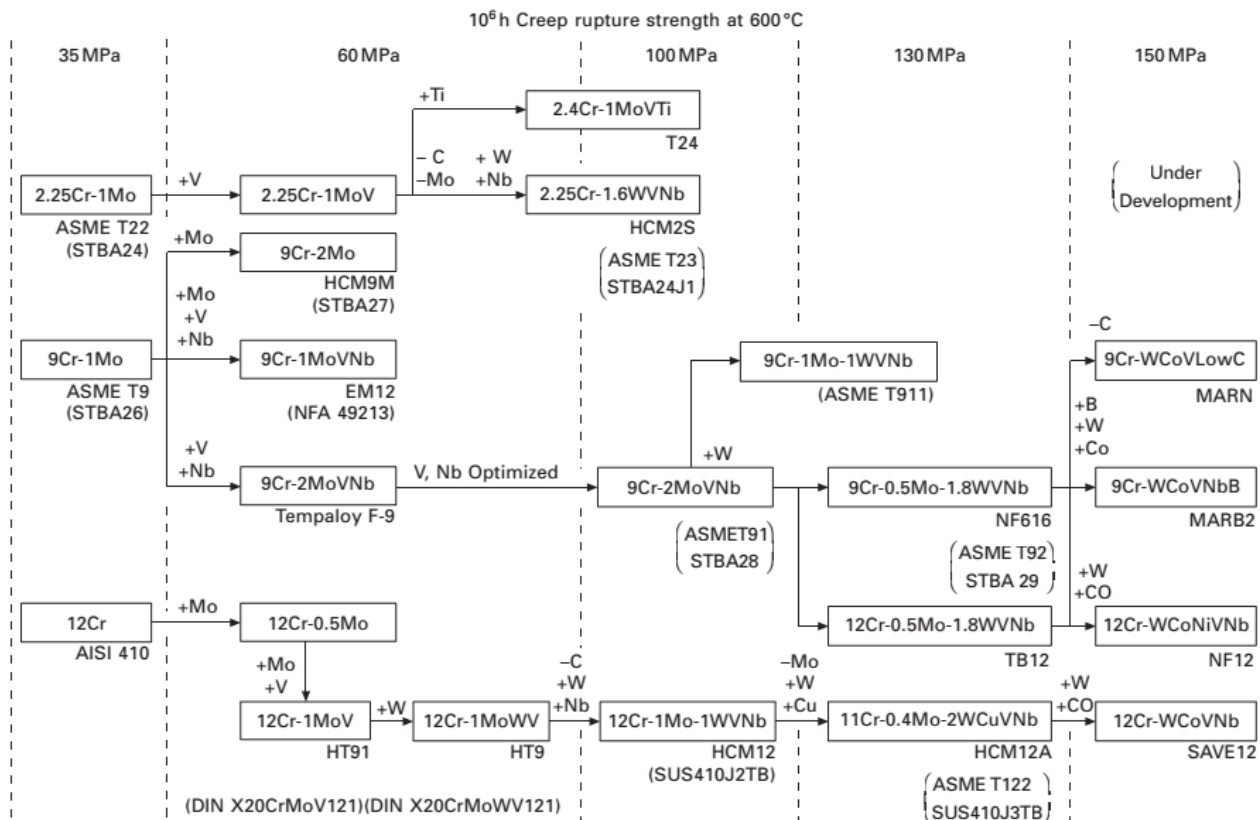
فولادهای فریتی کم آلیاژ از دسته فولادهای کروم-مولیبدنی هستند که عناصر دیگری مانند وانادیم، نایوبیم و تیتانیوم نیز به آن افزوده می شود. این فولادها اغلب به عنوان فولادهای مقاوم به خزش شناخته می شوند. این نوع فولادها به فولادهای فریتی معروف بوده و عموماً ساختار بینیتی دارند. با وجود مقاومت به خزش بالا،

استحکام این فولادها در حین سرویس تا حدود زیادی به رسوبات ریز درون میکروساختار بینیتی وابسته است [۷].

تاثیر عناصر مختلف بر روی میکروساختار با یکدیگر متفاوت است. برای مثال، کروم علاوه بر ایجاد مقاومت بالا به اکسیداسیون، می‌تواند از استحاله بینیتی جلوگیری کند. حضور ۹ تا ۱۲ درصد کروم باعث می‌شود تا مارتنزیت، فاز غالب در میکروساختار نهایی باشد. به طور مشابه، انواع مختلف عملیات حرارتی و همچنین سرعت‌های سرد کردن متفاوت، منجر به تشکیل ریزساختارهای متفاوتی می‌شود.

تمامی فولادها پس از تمپر شدن در یک حالت نیمه پایدار قرار دارند. در نتیجه، زمان‌های بیش‌تر کاری (سرویس) در دماهای بالا می‌تواند تغییرات متالورژیکی و در نهایت ناپایداری ساختار را در زمان‌هایی عموماً بیش از عمر طراحی سبب شود. در طی عملیات تمپر، Mo_2C پایدارترین کاربید تشکیل شده در فولادهای کم آلیاژ (بدون حضور وانادیم) محسوب می‌شود. این کاربید، انرژی جوانه زنی پایینی داشته و به صورت ذرات ریز سوزنی تشکیل می‌شود. نرخ رشد این رسوبات کاربیدی در دماهای کاری معمول بسیار کم است. دلیل این امر به وجود مرز کوهنت بین این رسوبات و فاز زمینه فریتی مربوط می‌شود. از طرف دیگر در فولادهای حاوی وانادیم، کاربیدهای صفحه‌ای V_4C_3 تشکیل می‌شود که همانند کاربیدهای Mo_2C بسیار پایدار بوده و مقاومت بالای خزشی را سبب می‌شود [۸].

شکل ۱-۲، روند توسعه فولادهای فریتی به کار رفته در بویلرها را نشان می‌دهد. این دسته بندی براساس میزان استحکام خزشی 10^6 ساعت در دمای ۶۰۰ درجه می‌باشد. از جمله مهمترین عیوب این فولادها می‌توان به مقاومت به خوردگی پایین‌تر آن‌ها نسبت به دیگر انواع فولادها اشاره کرد. این امر به مقادیر پایین‌تر غلظت عنصر کروم در ترکیب شیمیایی مربوط می‌شود. سرعت اکسیداسیون این فولادها هنگامی که تحت اتمسفر بخار قرار گیرند بیش‌تر از هنگامی است که در معرض هوا قرار داشته باشند [۹].



شکل ۲-۱) روند توسعه فولادهای فرتیتی در بویلرها [۸]

۲-۳) فولادهای زنگ نزن آستنیتی

فولادهای آستنیتی به طور عمده‌ای در ساخت لوله‌های نیروگاه‌های فوق بحرانی (دما در این نیروگاه‌ها به حدود ۷۰۰°C می‌رسد) در آمریکا و انگلستان مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین دمای بخار در سوپرهیتورها و ری‌هیتورها تعدادی از نیروگاه‌های انگلستان به حدود ۵۶۶°C می‌رسد. از این رو، جنس لوله‌های این اجزا از نوع فولادهای آستنیتی سری ۳۰۰ انتخاب شده است. پایه این مواد از نوع فولادهای ۱۸/۸ با ترکیب Fe18Cr8Ni می‌باشد. اصلی‌ترین آلیاژهای مورد استفاده را می‌توان به صورت زیر برشمرد:

• نوع ۳۰۴: Fe18Cr8Ni

• نوع ۳۱۶: Fe18Cr10Ni2.5Mo

• نوع ۳۲۱: Fe18Cr10NiTi

• نوع ۳۴۷: Fe18Cr10NiNb

در توسعه این فولادها ابتدا جنبه مقاومت به خوردگی در محیط‌های آبی مد نظر بوده و خواص خزشی کمتر مورد توجه قرار گرفته است [۶]. در جدول ۱-۲، خواص کلی فولادهای فریتی و آستنیتی با یکدیگر مقایسه شده است [۸].

جدول ۱-۲) مقایسه فولادهای آستنیتی و فریتی [۸]

کاربرد	انقباض حرارتی	مقاومت به اکسیداسیون	استحکام خزشی	قیمت	عناصر آلیاژی	
قطعات ضخیم، لوله بخار اصلی، روتور توربین	کم	ضعیف	پایین	کم	مقادیر کم عناصر Cr, Mo, W, V, Nb	فولادهای فریتی
قطعات نازک، لوله‌های سوپرهیتر	زیاد	خوب	بالا	بالا	مقادیر زیاد عناصر Ni, Cr	فولادهای آستنیتی

فولادهای آستنیتی به جهت داشتن شبکه کریستالی FCC در مقایسه با شبکه کریستالی BCC فولادهای فریتی، ضریب نفوذ در خود کمتری نسبت به فولادهای فریتی دارند. از این رو، مقاومت خزشی فولادهای آستنیتی عموماً بالاتر از فولادهای فریتی است. علاوه بر آلیاژهای ذکر شده در بالا، آلیاژ ۳۱۰ با ترکیب شیمیایی Fe25Cr20Ni نیز موجود است که مقاومت به خوردگی خوبی تا دماهایی نزدیک به ۱۰۰۰°C از خود نشان می‌دهد و تنها به صورت پوشش (Cladding) سطوح در معرض آتش مورد استفاده قرار می‌گیرد [۸].

آلیاژ اصلاح شده ۳۰۴H (که نوع اصلاح شده فولاد آستنیتی ۳۰۴ است) نیز به طور گسترده‌ای در لوله‌های سوپرهیتر بویلرها مورد استفاده قرار می‌گیرد. این امر به خواص مکانیکی عالی این آلیاژ در دماهای بالا مربوط می‌شود. با این وجود درصد کربن این آلیاژ بالاست که این امر باعث افزایش حساسیت آلیاژ به ایجاد ترک خوردگی-تنشی (SCC) می‌شود. ابوالعزم و همکاران [۱۰] در بررسی‌های خود نشان داده‌اند که آسیب از سطوح داخلی لوله‌های بخار شروع می‌شود. همچنین، آسیب به صورت ترک‌های بین‌دانه‌ای خود را نشان می‌دهد (شکل ۲-۲).

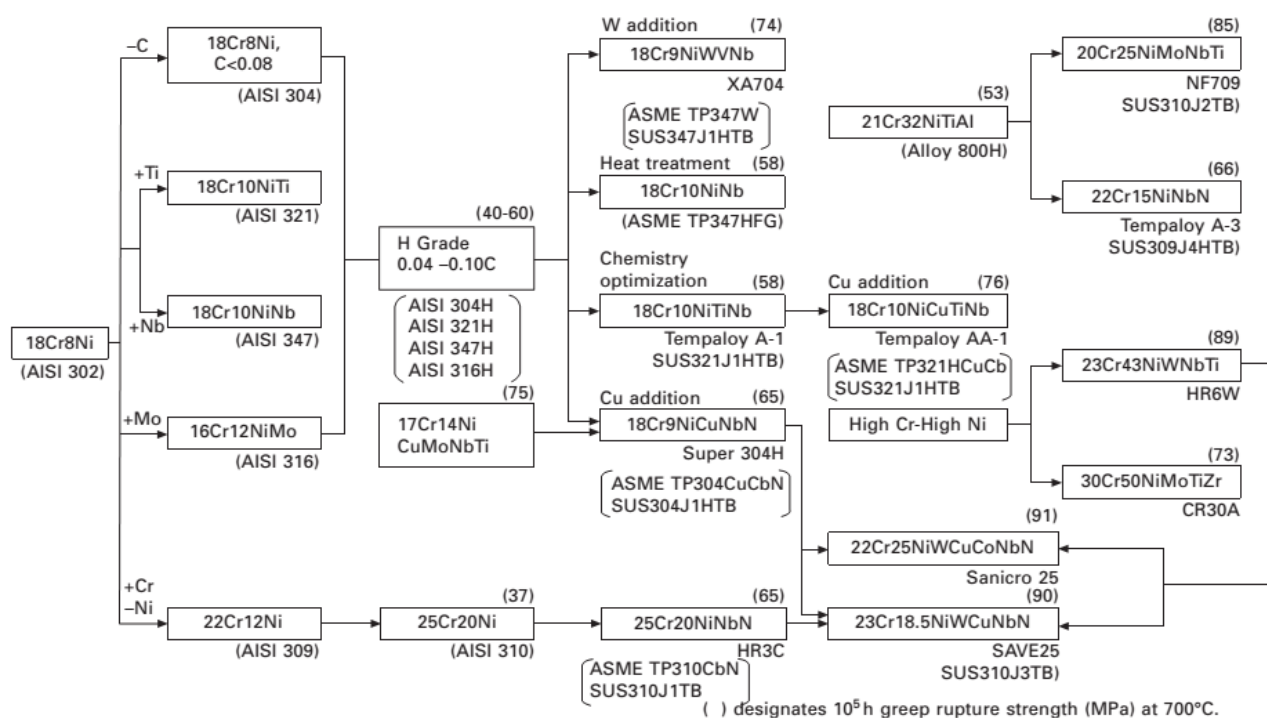


شکل ۲-۲) ترک خوردگی-تنشی در لوله‌های بخار [۱۰]

بر این اساس، سه شرط برای فعال شدن این مکانیزم پیشنهاد گردید. شرط اول به میکروساختار فولاد مربوط می‌شود. فولاد حساس به ترک خوردگی-تنشی باید دارای توزیع یکنواختی از ذرات رسوبی کاربید کروم در راستای مرزهای دانه باشد. فاکتور تاثیرگذار دیگر بر روی ایجاد ترک بین‌دانه‌ای خوردگی-تنشی، میزان تنش

است. بررسی لوله‌هایی که در زیر قسمت جوشکاری شده دچار ترک شده‌اند، شواهدی را مبنی بر وجود کرنش پلاستیک در ناحیه ترک نشان می‌دهد. محل‌هایی که تغییر شکل پلاستیک یافته‌اند، مناطق مستعد ایجاد ترک هستند. عامل تاثیرگذار دیگر بر روی این مکانیزم، حضور ترکیبات حاصل از خوردگی است. مناطق زنگ زده و رسوبات توزیع خاصی را در مناطق مشخصی از سطح لوله نشان می‌دهند. درون بسیاری از این زنگ‌ها، خوردگی حفره‌ای (Pitting) اتفاق می‌افتد. رسوبات درون این حفره‌ها غنی از آهن و اکسیژن (با رنگ قرمز یا نارنجی) و یا غنی از آهن، کروم، نیکل و اکسیژن (با رنگ خاکستری) هستند [۱۰].

در شکل ۲-۳، روند توسعه فولادهای آستنیتی لوله‌های بویلر آورده شده است. لازم به ذکر است که اعداد درون پرانتز، استحکام خزشی 10^5 ساعت (بر حسب MPa) در دمای ۷۰۰ درجه را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۳ روند توسعه فولادهای آستنیتی لوله‌های بویلر [۸]

با وجود مقادیر بالای عناصر آلیاژی در فولادهای آستنیتی، سطوح لوله‌های سوپرهیتر در معرض آتش مستعد ایجاد عیوب هستند. تلاش‌هایی در انگلستان برای رفع این مشکل انجام شده که البته کاملاً موفقیت آمیز

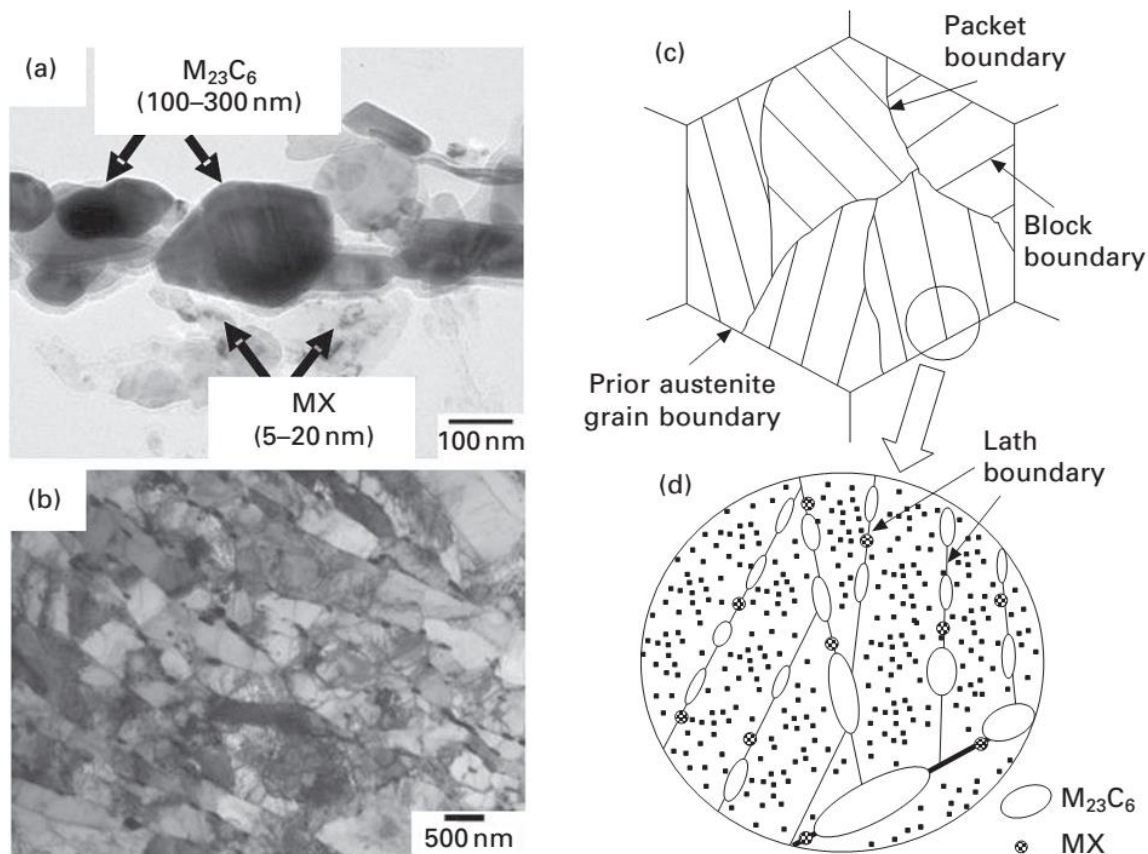
نبوده است. از جمله این تلاش‌ها، افزودن ۰.۶٪ منگنز به ترکیب شیمیایی به منظور بهبود جوش‌پذیری فولاد آستنیتی بوده است. بسیاری از دیگر کشورها راهکارهای محافظه‌کارانه‌تری را اتخاذ کرده‌اند. دمای بخار در نیروگاه‌های این کشورها کمتر از 540°C است که اجازه استفاده از فولادهای کم آلیاژ فریتی را می‌دهد. تا این زمان، آلیاژ استاندارد در نیروگاه‌های بخار سوخت فسیلی، فولاد فریتی/بینیتی T22 با ترکیب 2.25Cr-1Mo بوده است. با این حال، هنگامی که خوردگی در معرض آتش یک مسئله جدی باشد، از آلیاژ X20 (فولاد زنگ نزن مارتنزیتی با ۱۲٪ کروم) استفاده می‌شود. برای مثال اخیراً لوله‌های ری‌هیتر یکی از نیروگاه‌های کشور کویت که از فولاد 2.25Cr-1Mo ساخته شده‌اند، دچار خرابی‌های متعددی خصوصاً در زمان‌های بحرانی تولید انرژی در فصل تابستان شده‌اند. این مسئله باعث شد که جنس فولادهای ری‌هیتر با فولادهای مارتنزیتی X20 (CrMoV12-1) جایگزین شود. عمر پیش‌بینی شده برای فولادهای X20 در ری‌هیتر بیش از ۳۰ سال است [۱۱].

با این وجود، فولادهای X20 اشاره شده در کمتر از ۱۰ سال دچار خرابی شده‌اند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که نقش خزش در این آسیب‌ها بسیار کم است و آسیب‌ها عمدتاً از خوردگی سطوح در معرض آتش ایجاد شده‌اند. دلیل این مسئله به استفاده از شعله حاصل از نفت خام (حاوی مقادیر بالای سولفور و وانادیم) باز می‌گردد. خوردگی سطوح در معرض آتش در لوله‌های بویلر عموماً بر اثر واکنش ذرات سولفور موجود در گاز با سطح فلز ایجاد می‌شود. همچنین، حضور وانادیم سبب خرابی لایه اکسیدی محافظ و در نتیجه خوردگی تجمعی در آن مناطق می‌شود [۱۲، ۱۳].

۴-۲) متالورژی فولادهای مارتنزیتی

فولادهای ۹٪ کروم مانند P91، P92 و E911 توجه زیادی را در سه دهه اخیر به خود جلب کرده‌اند. این فولادها به علت مقاومت خزشی بالا، مقاومت به خوردگی خوب و قابلیت تولید عالی، مهمترین مواد جهت استفاده در سوپرهیترها و ری‌هیترها محسوب می‌شوند. در این سه فولاد ذکر شده، استحاله مارتنزیتی باعث ایجاد دانسیته بالایی از نابجایی‌ها می‌شود که این امر استحکام زیادی را به فولادها می‌بخشد [۱۴].

به منظور رسیدن به خواص بهینه در فولادهای مارتنزیتی حاوی ۹ تا ۱۲ درصد کروم از عملیات نرمالیزه و تمپر کردن استفاده می‌شود. در شکل ۴-۲، فاز مارتنزیت تمپر شده در یک فولاد مارتنزیتی نشان داده شده است.



شکل ۴-۲ (a) و (b) تصاویر TEM از مارتنزیت تمپر شده در فولاد 9Cr3W3CoVNb، (c) و (d) شماتیک ریزساختار

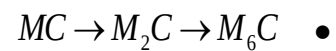
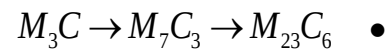
مارتنزیت تمپر شده [۸]

همان‌گونه که در شکل ۴-۲ نشان داده شده، فاز مارتنزیت ساختاری لایه‌ای داشته که درون مرزدانه‌های آستنیت قبلی ایجاد می‌شود. استحکام شکست این فولادها غالباً به عوامل زیر بستگی دارد:

- استحکام دهی محلول جامد توسط اتم‌های کربن، کروم، مولیبدن و تنگستن
- نوع، اندازه و توزیع رسوبات ریز
- دانسیته نابجایی‌ها درون زیردانه‌ها

- اندازه دانه آستنیت اولیه

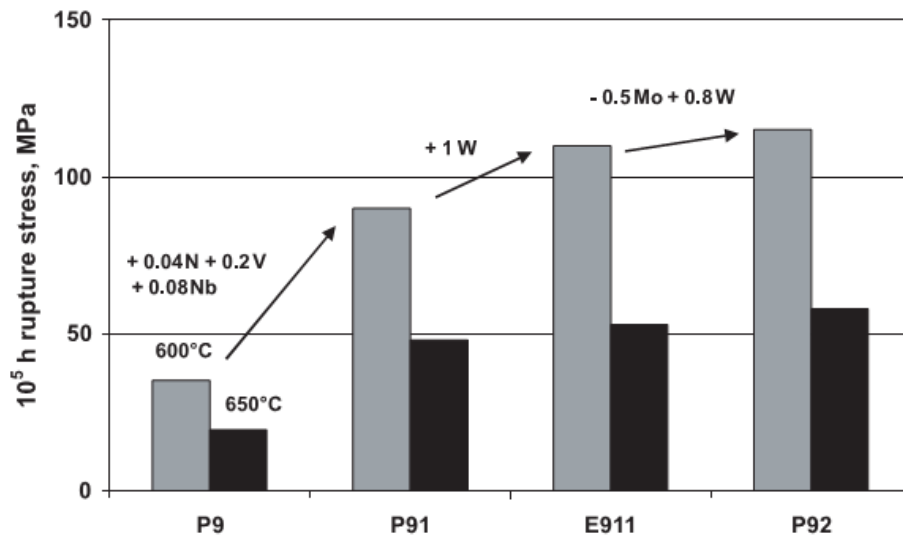
در طی فرآیند سرد شدن از دمای آستنیت و خصوصاً در هنگام تمپر، تشکیل کاربیدها رخ می‌دهد. مهمترین این کاربیدها و استحاله آن‌ها در زیر خلاصه شده است:



- انواع کربونیتريدها

در این فولادها، فاز مارتنزیت در محدوده وسیعی از سرعت‌های سرد شدن حاصل می‌شود. با این وجود، در سرعت‌های سرد شدن خیلی کم (که عموماً در مقاطع ضخیم چنین شرایطی وجود دارد) امکان دارد که فاز ضعیف‌تر فریت تشکیل شود [۶].

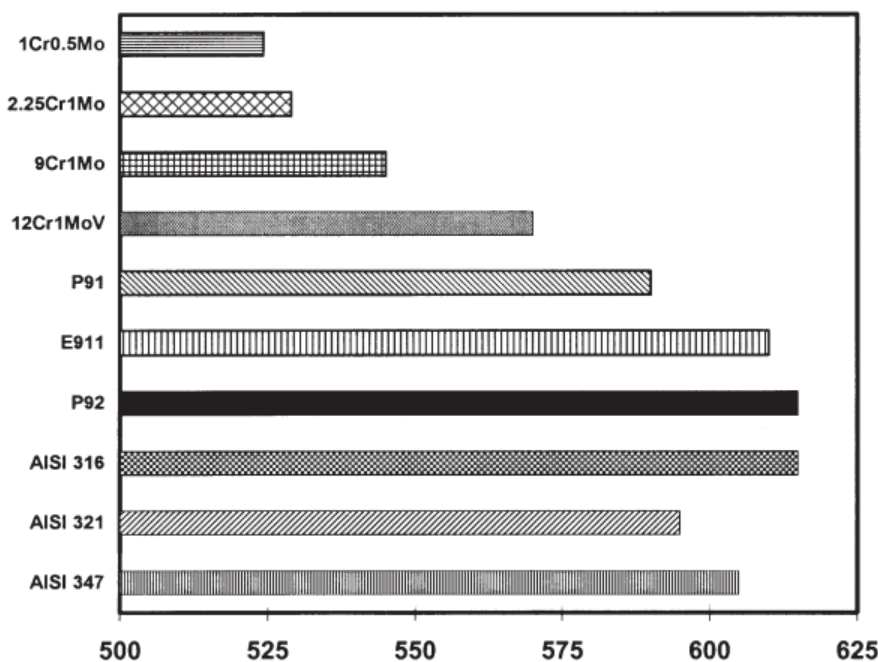
برای مثال، مقاومت بالای خزشی فولاد P91 را می‌توان ناشی از استحکام بخشی استحاله مارتنزیتی به همراه اثر استحکام بخشی اضافی رسوب کاربیدها، نیتريدها و کربونیتريدهای Nb و V دانست. در فولادهای P92 و E911، افزوده شدن W باعث استحکام بخشی اضافی ناشی از محلول جامد در فاز زمینه مارتنزیت می‌شود. در شکل ۲-۵، استحکام شکست خزشی ۱۰۰ هزار ساعت در ۶۰۰ و ۶۵۰°C برای فولادهای مارتنزیتی با ۹ درصد کروم مقایسه شده است.



شکل ۲-۵) استحکام شکست خزشی ۱۰۰ هزار ساعت در ۶۰۰ و ۶۵۰°C برای فولادهای مارتنزیتی با ۹ درصد کروم [۱۵]

با این حال هنگام قرار گرفتن این فولادها در دماهای کاری، دانسیته نابجایی‌ها به علت اثر بازیابی کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که ساختار زیردانه‌ها (دانه‌های فرعی) در استحکام خزشی بلند مدت نقش مهمی را ایفا می‌کند. از این رو تغییرات ریزساختار بدین معناست که باید در برون‌یابی داده‌های آزمایشگاهی جهت تعیین عمر طراحی احتیاط کرد. برای این منظور تنها داده‌هایی که نشان‌دهنده شکست خزشی در زمان‌هایی بیش از ۳۰۰۰ ساعت باشند قابل استناد هستند.

افزایش بازدهی حرارتی یک نیروگاه به طور عمده از طریق افزایش دمای کاری و به مقدار کمتری توسط افزایش فشار بخار ورودی به توربین حاصل می‌شود. بسیاری از نیروگاه‌های بخار مدرن با بازدهی نزدیک به ۴۲ درصد در دماهایی نزدیک به ۶۰۰°C و فشار ۲۵ تا ۳۰ MPa عمل می‌کنند. نسل جدیدتر نیروگاه‌ها در پی رسیدن به بازدهی ۴۵ درصد با دماهای کاری ۶۲۵ تا ۶۵۰°C است. افزایش دمای کاری نیروگاه در گرو توسعه فولادهای سازنده بویلر است. در شکل ۲-۶، بیشینه دمای کاری فولادهای مختلف برای استحکام شکست ۱۰۰ MPa در زمان ۱۰۰ هزار ساعت با یکدیگر مقایسه شده است [۱۵].



شکل ۲-۶) مقایسه مقاومت خزشی فولادهای مختلف

همان گونه که مشاهده می شود، دمای بیشینه کاری با پیچیده تر شدن ترکیب شیمیایی فولاد افزایش می یابد. بعلاوه، استحکام شکست فولادهای پر کروم جدید مشابه فولادهای آستنیتی زنگ نزن است. اهمیت این موضوع به این نکته باز می گردد که استفاده از فولادهای آستنیتی به دلیل بالا بودن ضریب انبساط حرارتی (نزدیک به ۵۰ درصد بیش تر از فولادهای فریتی) چندان مطلوب نیست. بالا بودن ضریب انبساط حرارتی سبب ایجاد تنش های حرارتی اضافی شده که می تواند موجب شکست خستگی در هنگام گرم و سرد کردن فولاد شود.

با وجود خواص مطلوب فولادهای مارتنزیتی، مناطق جوش در این فولادها همانند فولادهای کم آلیاژ دچار ترک نوع IV و شکست در منطقه می شوند [۱۶]. نمونه ای از ترک نوع IV در شکل ۲-۷ نشان داده شده است.



شکل ۲-۷) نمونه‌ای از ترک نوع IV در منطقه ریزدانه HAZ فولاد P91 [۱۷]

اکنون مشخص شده است که این فولادها برخلاف تصور اولیه از آن‌ها چندان ایده‌آل نیستند. روش‌های بازرسی و مانیتورینگ عیوب در این دسته از فولادها نیازمند توسعه است. روش‌های معمول بازرسی غیر مخرب همانند التراسونیک تنها پس از گذشت حدود ۷۰ تا ۸۰ درصد عمر این فولادها قادر به تشخیص حفره‌زایی خزشی هستند. یکی از دلایل این مسئله این است که در این فولادها برخلاف فولادهای فریتی کم آلیاژ، تغییراتی مانند کروی شدن و یا شکسته شدن ریزساختار در مقیاس قابل مشاهده با میکروسکوپ نوری یا الکترونی روبشی (SEM) رخ نمی‌دهد. در این مورد نیز تشخیص تغییرات رسوبات و دانسیته نابجایی‌ها حتی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) چندان ساده نیست [۱۷].

۱-۴-۲) تاثیر عناصر آلیاژی بر خواص فولادهای مارتنزیتی

در ادامه اثر برخی از عناصر آلیاژی بر روی ساختار مارتنزیتی مورد بحث قرار می‌گیرد.

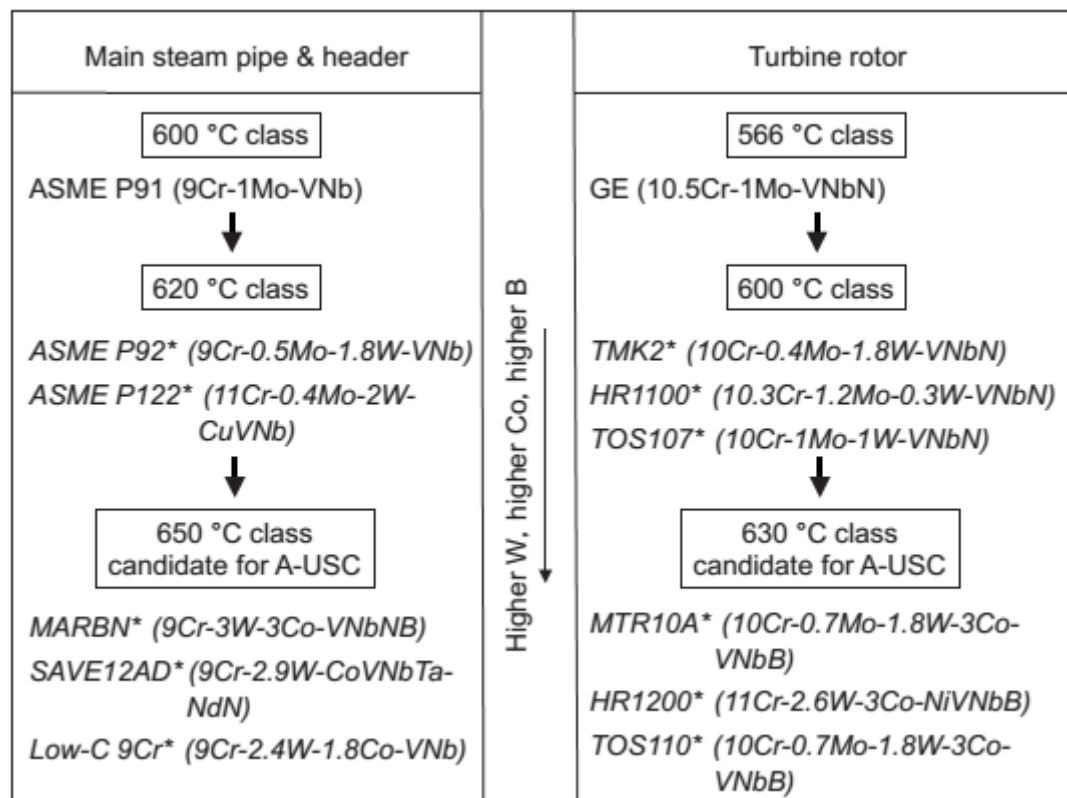
مولیبدن و تنگستن

میکروساختار فولادهای حاوی ۹ درصد کروم که عناصر آلیاژی مهمی مانند W, Mo, Nb و V به آن افزوده شده، شامل مارتنزیت تمپر شده است که جزایر فریت دلتا (δ) در طی سرد شدن درون آن تشکیل می‌شود. ایگاراشی و همکاران نشان داده‌اند که تشکیل فریت دلتا با ناهمگنی تغییر شکل خزشی همراه است. تغییر شکل خزشی ناهمگن در تنش‌های پایین مهمترین عامل در کاهش مقاومت به خزش محسوب می‌شود [۱۸].

هر دو عنصر Mo و W با عنصر Cr در یک خانواده هستند و لذا اثر مشابهی را در فولادهای پر کروم ایفا می‌کنند. این امر بدین معناست که سهم آن‌ها در بهبود استحکام خزشی ناشی از نقش آن‌ها در استحکام دهی محلولی است. از طرف دیگر، این عناصر با تشکیل کاربیدها و کربونیت‌ریدها (استحکام دهی رسوبی) به بهبود خواص خزشی کمک می‌کنند. وزن اتمی W نزدیک به دو برابر Mo است. از این رو میتوان گفت که اثر استحکام بخشی W نزدیک به دو برابر Mo است. همچنین به علت نرخ نفوذ پایین W، کاربیدها و کربونیت‌ریدهای آن نیز پایداری بیش‌تری دارند. با این حال، نکته جالب اینجاست که استحکام بالا تنها در صورتی حاصل می‌شود که هر دو عنصر Mo و W با هم در ساختار حضور داشته باشند. نتایج آزمایش‌های خواص مکانیکی در ژاپن نشان می‌دهد که حضور یک درصد Mo به همراه یک درصد W خواص بهینه‌ای را ایجاد می‌کند. با این وجود، به علت اینکه Mo از عوامل مهم تشکیل دهنده فریت δ است (که سبب پایین آمدن استحکام شکست و استحکام ضربه می‌شود)، مقدار ۰/۵ درصد Mo و ۲ درصد W (مانند فولادهای P92 و P122) معمول‌تر است [۶]. توسعه این فولادها توسط جایگزین کردن بخشی از مولیبدن و یا تمام آن با تنگستن به همراه افزودن کبالت، نیتروژن، نایوبیم و بور حاصل شده است. افزایش عنصر تنگستن که پایدارکننده فاز فریت است نیازمند افزودن مقدار بیش‌تری کبالت (که پایدارکننده فاز آستنیت است) به ترکیب شیمیایی جهت جلوگیری از تشکیل فاز فریت است [۱۹].

شکل ۲-۸، برنامه توسعه فولادهای مارتنزیتی را در کشور ژاپن برای استفاده در بویلرها نشان می‌دهد. توسعه فولادهای مارتنزیتی ۹ تا ۱۲ درصد کروم توسط جایگزینی تمام یا بخشی از مولیبدن با عناصر تنگستن، کبالت، نیتروژن، نایوبیم و بور حاصل شده است. فولادهایی با علائم اختصاری MTR10A، HR1200 و

TOS110 (شکل ۲-۸) قبل از پروژه ساخت فولادهای مورد استفاده در نیروگاههای فوق بحرانی جهت استفاده در روتور توربینهایی با دمای کاری ۶۳۰ درجه توسعه یافته‌اند.



شکل ۲-۸) برنامه توسعه فولادهای مارتنزیتی را در کشور ژاپن

وانادیم و نایوبیم

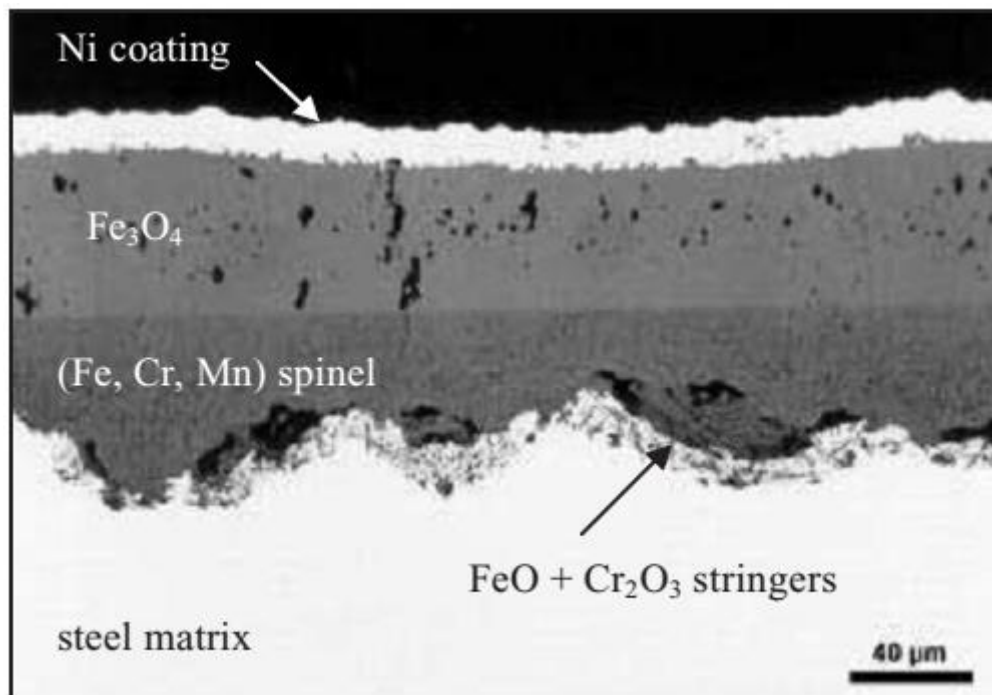
در فولادهای 9Cr، حلالیت رسوبی MX غنی از وانادیم (که در طی عملیات تمپرینگ تشکیل می‌شود) بسیار بالاست. رسوبات MX عملاً به صورت رسوبات بسیار ریز VN (که حاوی مقادیر بسیار کم Cr و Nb است) وجود دارند. عناصر حل شده V و N در دمای آستنیت شده سبب تسریع تشکیل رسوبات VN در فرآیند تمپر و به طور عمده در فرآیند خزش می‌شود. این رسوبات در طی فرآیند خزش، نرخ درشت شدن بسیار پایینی دارند. نایوبیم با تشکیل کربونیت‌ریدهای Nb(C,N) مقدار N لازم برای تشکیل VN را کاهش می‌دهد. با این وجود، مزیت وجود این رسوبات به نقش آنها به عنوان مناطق مستعد جوانه زنی رسوبات VN باز می‌گردد

[۲۱،۲۰].

۵-۲) مقاومت به اکسیداسیون فولادهای پر کروم

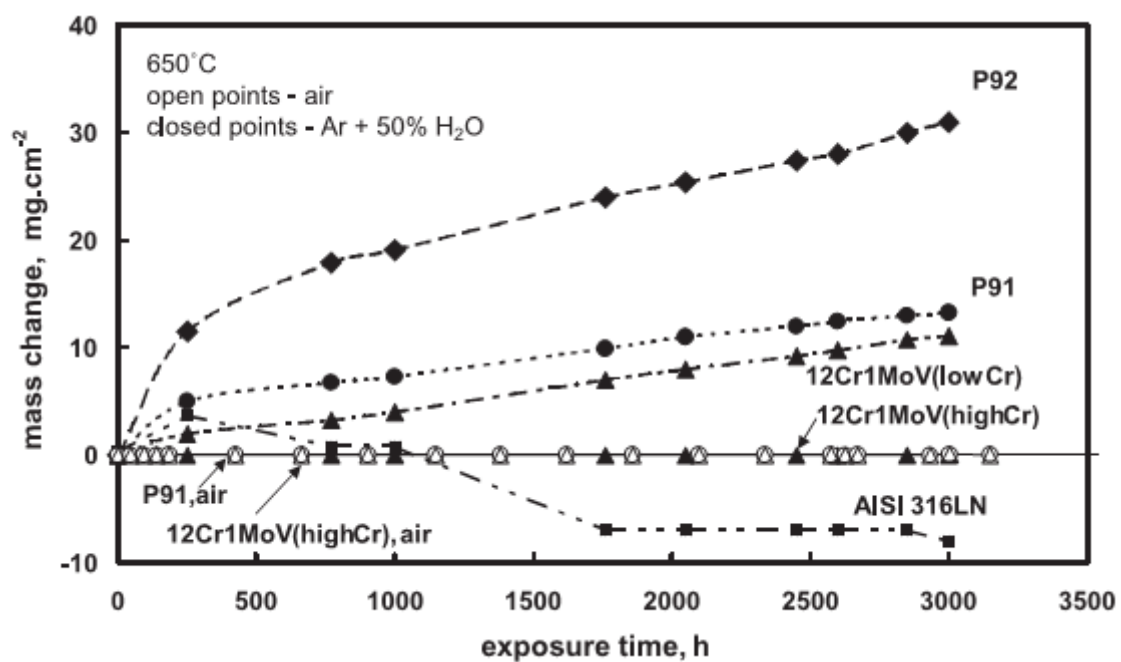
مقاومت به خوردگی موادی که در دماهای بالا عمل می‌کنند غالباً براساس تشکیل یک لایه اکسیدی مقاوم بر اثر اکسیداسیون یک یا چند عنصر است. برای این منظور دو شرط باید برآورده شود: ابتدا باید غلظت کافی از عناصر مورد نظر در ساختار موجود باشد و دوم آنکه سرعت نفوذ آن‌ها به منظور تامین محافظت بلند مدت به قدر کافی زیاد باشد. با توجه به این مطالب، کروم مهمترین عنصر جهت محافظت از اکسیداسیون محسوب می‌شود.

در توسعه فولادهای 9Cr1Mo، بیش‌تر بر روی بهبود استحکام شکست تاکید شده است. آزمایش‌های خزشی بلند مدت در دماهای نزدیک به 650°C و در معرض هوا نشان می‌دهد که مقاومت به اکسیداسیون بر اثر تشکیل لایه اکسیدی بسیار کوهنت به بهترین حالت خود می‌رسد. ترکیب لایه‌های محافظ در فولادهای ۹٪ کروم به صورت $(\text{Fe,Cr})_2\text{O}_3$ و $(\text{Fe,Cr,Mn})_3\text{O}_4$ می‌باشد. با این وجود، هنگامی که فولاد در معرض اتمسفر حاوی بخار باشد (همانند بویلرها)، لایه تشکیل شده در 600°C و 650°C ، لایه‌های ضخیمی شامل لایه خارجی Fe_3O_4 و لایه دوفازی درونی Fe_3O_4 و $(\text{Fe,Cr,Mn})_3\text{O}_4$ را شامل می‌شود. در پایین لایه اکسیدی، اکسیداسیون داخلی کروم به منظور تشکیل $(\text{Fe,Cr,Mn})_3\text{O}_4$ در مرز تیغه‌های مارتنزیت رخ می‌دهد. شکل ۲-۹، لایه معمول اکسیدی را در فولادهای ۹٪ کروم در اتمسفر حاوی بخار و دمای 650°C نشان می‌دهد.



شکل ۹-۲) میکروساختار لایه اکسیدی تشکیل شده در فولاد P91 [۱۵]

همچنین شکل ۲-۱۰، خلاصه‌ای از تغییرات جرمی پیش‌آمده بر اثر تشکیل شدن لایه اکسیدی را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱۰) تغییرات جرمی فولادهای کرم دار در هوا بر حسب زمان [۱۵]

از طرفی، تشکیل رسوبات اکسیدی می‌تواند نگرانی‌هایی را بابت نرخ اکسیداسیون بالا ایجاد کند. کاهش سطح مقطعی که در معرض تنش قرار دارد تنش وارده شده را افزایش می‌دهد که این امر کاهش عمر کاری را در پی دارد. از طرفی کاهش عمر می‌تواند به ضخامت اولیه دیواره قطعات وابسته باشد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که کاهش عمر در دمای 650°C به طور عمده در قطعاتی با ضخامت کمتر از ۶mm رخ می‌دهد. مشکل دوم به کنده شدن لایه اکسیدی مربوط است. حضور ذرات اکسیدی کنده شده در بخار ورودی به توربین سایش پره‌های توربین را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، لایه‌های اکسیدی ضخیم در لوله‌های سوپرهیتر و ری‌هیتر باعث کاهش انتقال حرارت و در نتیجه افزایش حرارت و شکست خزشی لوله‌ها می‌شود. مقاومت بالاتر نسبت به اکسیداسیون توسط افزودن عناصر تشکیل دهنده لایه اکسیدی مثل Si و Mn به دست می‌آید. هر چند در افزودن Si باید توجه داشت که این عنصر از طرفی پایدارکننده فاز فریت بوده و از طرفی سبب کاهش تافنس فولاد می‌شود. به طور خلاصه می‌توان روش‌های زیر را جهت افزایش مقاومت به اکسیداسیون فولادهای کروم‌دار تحت اتمسفر بخار برشمرد:

- مقدار Cr حداقل باید ۱۱٪ باشد؛
- افزودن عناصر با اکسیداسیون بالا مثل Si و Mn؛
- افزایش نفوذپذیری Cr به سطح توسط افزودن عناصر آلیاژی مناسب و یا عملیات تغییرشکل سطوح (مانند ساچمه‌زنی). این کار همچنین باعث افزایش چسبندگی لایه اکسیدی Cr_2O_3 می‌شود [۱۵].

فصل سوم

مروری اجمالی بر آسیب‌های بویلر

در این فصل تلاش شده تا به عوامل مهم تخریب در لوله‌های بویلر از منظر به‌روز رسانی منابع موجود اشاره شود. تخریب می‌تواند در قسمت‌های مختلف یک بویلر اتفاق بیفتد. به طور کلی، سهم تخریب لوله‌های بویلر را می‌توان اینگونه برشمرد که سهم تخریب لوله‌های واتروال کوره ۴۰٪، لوله‌های سوپرهیتر ۳۰٪، لوله‌های ری‌هیتر ۱۵٪ و لوله‌های اکونومایزر ۱۰٪ است [۲۲]. در ادامه به عوامل مهم این تخریب‌ها اشاره خواهد شد.

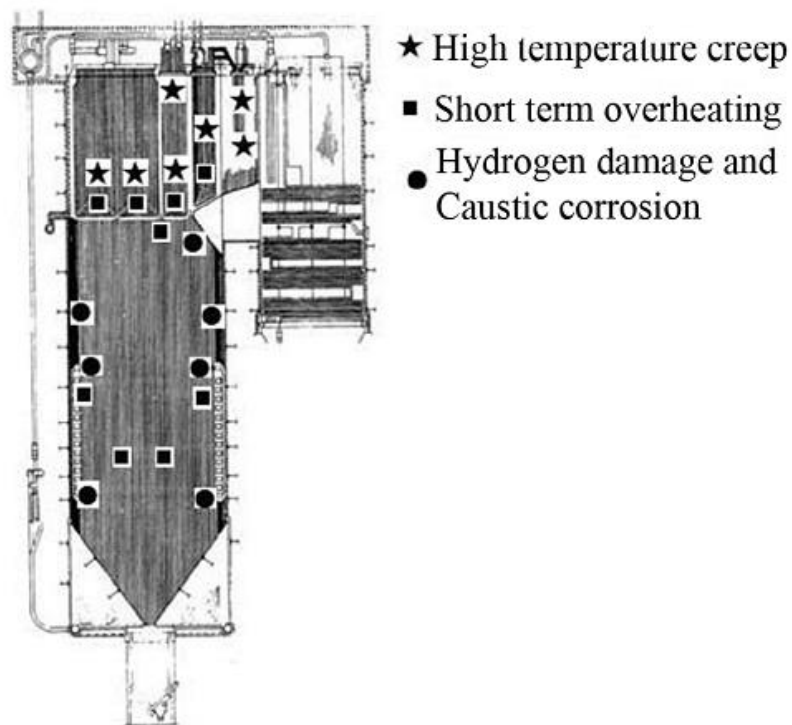
۲-۳) گسیختگی تنش

تنش و دما دو عامل مهم در کنترل عمر لوله‌های بویلر هستند. از این نظر می‌توان گفت که استحکام لوله بویلر تابعی از تنش اعمالی و نیز دمایی است که فلز در محدوده فرآیند خزش قرار دارد. از آنجایی که افزایش این دو فاکتور باعث کاهش عمر گسیختگی فولاد می‌شود، باید به کنترل این دو عامل جهت جلوگیری از گسیختگی توجه زیادی داشت. آسیب گسیختگی در قسمت‌های سوپرهیتر و ری‌هیتر بویلرها اتفاق می‌افتد. این آسیب همچنین می‌تواند در لوله‌های خنک کننده آب هنگامی که انتقال حرارت غیرعادی رخ دهد، اتفاق می‌افتد. اگر ضخامت لوله بر اثر خوردگی و یا سایش کاهش یابد، تنش هوپ افزایش می‌یابد که این امر کاهش استحکام گسیختگی را به همراه دارد. تنش هوپ در یک لوله توسط قطر و ضخامت لوله تعیین می‌شود:

$$\sigma_h = PD / 2W. \quad (1)$$

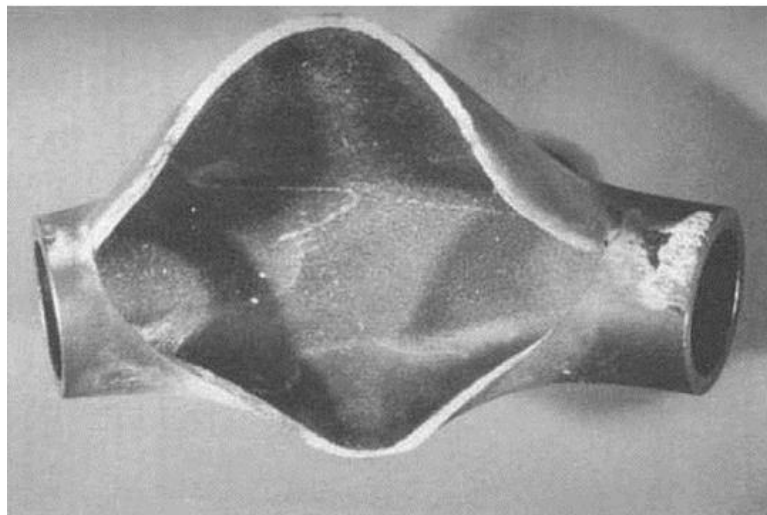
که σ_h تنش هوپ، P فشار داخلی لوله، D قطر متوسط لوله و W ضخامت دیواره لوله است.

زمان فاکتور مهمی در اینگونه عیوب محسوب می‌شود و لذا اینگونه آسیب‌ها را اصطلاحاً "کوتاه مدت" و یا "بلند مدت" می‌نامند. شکل ۱-۳، مناطقی در بویلر را نشان می‌دهد که آسیب کوتاه مدت ناشی از اورهیت شدن در آن‌ها رخ می‌دهد [۲۳].



شکل ۳-۱) انواع آسیب‌ها در مناطق مختلف بویلر [۲۳]

شکل ۳-۲) نیز نمونه‌ای از آسیب وارد شده تحت اورهیت کوتاه مدت را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۲) نمونه‌ای از آسیب وارد شده در شرایط اورهیت کوتاه مدت [۲۳]

اورهیت کوتاه مدت به دلیل افزایش دمای بیش از حد مجاز فلز لوله اتفاق می افتد. در گزارشات مختلف این افزایش دما در حدود ۱۰۰ درجه بالاتر از حد طراحی عنوان شده است. اورهیت کوتاه مدت در موقعیت های زیر در لوله های واتروال و سوپرهیتر می تواند اتفاق بیافتد:

- در محل گرفتگی لوله ها به دلیل وجود نخاله ها و پوسته های اکسیدی
 - در محلی که در اثر خروج نامناسب شعله از مشعل ها، درجه حرارت لوله ها به صورت موضعی افزایش یافته است،
 - در محلی که در اثر نشتی یا گردش ضعیف آب، سیر کلاسیون آب دچار اختلال شده است.
- غیرعادی شدن سیرکولاسیون آب تغذیه و افزایش محصولات احتراق یا نامتقارن شدن شعله از جمله عوامل ایجاد اورهیت کوتاه مدت محسوب می شوند. غیر عادی شدن جریان آب در اثر وجود مانع، کاهش سطح آب درام، کاهش آب در حال گردش از عوامل اصلی این پدیده است [۲۴].

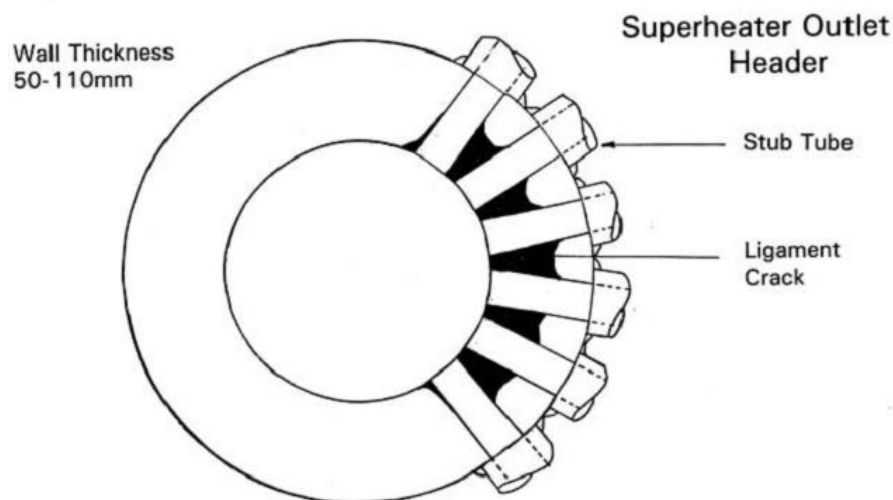
۱-۲-۳) خزش (اورهیت بلند مدت)

یکی از مسائل مهم در طراحی قطعاتی مانند اجزای بویلر نیروگاه های تولید برق که در دماهای بالا کار می کنند، تنش مجاز وارده تحت شرایط خزشی است. این تنش مجاز براساس استحکام شکست خزشی در ۱۰۰ هزار ساعت (و در دمای سرویس) و یا در برخی موارد ۲۰۰ تا ۵۰۰ هزار ساعت است [۲۵].

تقریباً ۹۰ درصد آسیب ها ناشی از اورهیت بلند مدت در سوپرهیترها، ری هیترها و لوله های دیواره رخ می دهد. همچنین این آسیب در اکونومایزر به ندرت اتفاق می افتد [۲۴]. مطالعات هاسین و همکاران [۲۶] نشان می دهد که اورهیت شدن با توجه به تشکیل لایه اکسیدی درون لوله می تواند بزرگ ترین آسیب لوله ها معرفی شود. کاردوسو و همکاران [۲۷] نیز در تحقیقات خود نشان داده اند که تشکیل لایه اکسیدی می تواند به عنوان عایق حرارتی عمل کرده و باعث اورهیت شدن لوله شود.

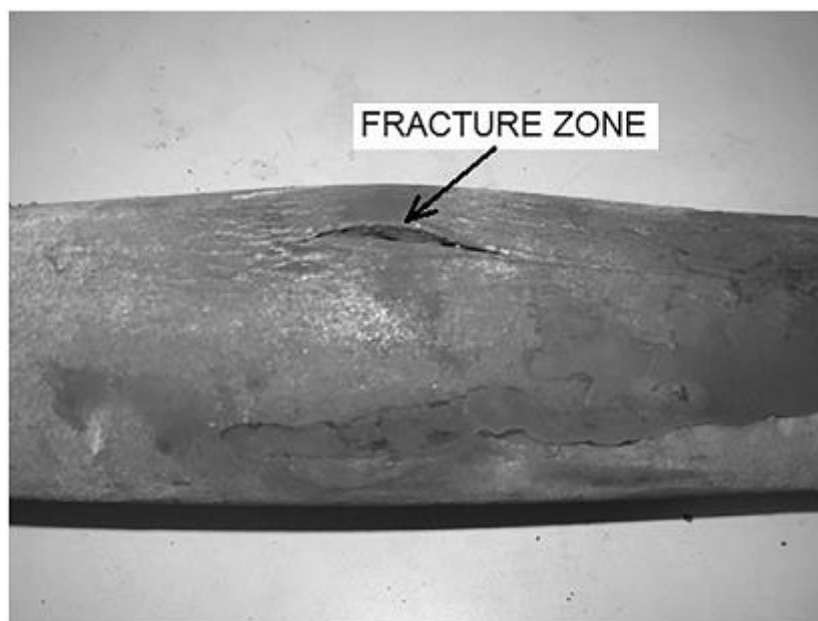
عوامل زیادی بر روی عمر خزشی قطعاتی که در دماهای بالا کار می‌کنند تاثیرگذار است که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- تنش و دما: با افزایش تنش و دما، مقاومت به خزش و در نتیجه عمر خزشی کاهش می‌یابد.
- ترکیب شیمیایی: عناصری که باعث استحکام دهی محلول جامد می‌شوند (Mo, W) و عناصری که سبب رسوب‌سختی می‌شوند (Nb, V) می‌توانند سبب بهبود عمر خزشی شوند.
- ریزساختار: بازیابی دینامیکی، تبلور مجدد، درشت شدن رسوبات و حفرات و ترک‌های ایجاد شده حین خزش، باعث افزایش نرخ خزش می‌شوند.
- عملیات حرارتی: عملیات حرارتی سبب اصلاح اندازه دانه و توزیع رسوبات می‌شود که بر روی نرخ خزش تاثیرگذارند.
- پیش‌کرنش (کار سرد): کار سرد باعث افزایش دانسیته نابجایی‌ها می‌شود که این امر افزایش بازیابی حرارتی و تبلور مجدد را در دماهای بالا به همراه دارد. در نتیجه این فرآیندها، نرخ خزش افزایش می‌یابد.
- اکسیداسیون و خوردگی: این عوامل عموماً باعث کاهش سطح مقطع قطعات و در نتیجه کاهش عمر خزشی می‌شود.
- حالت بارگذاری: حالت تنشی چند محوره باعث افزایش آسیب خزشی می‌شود. همچنین بارگذاری سیکلی (حالت خزشی-خستگی) نیز عمر خزشی را کاهش می‌دهد [۸]. از جمله مثال‌های مهم در این زمینه می‌توان به ایجاد شدن ترک در لیگامنت‌های داخلی هدرهای سوپرهیتر که بر اثر فرآیند خستگی-خزشی اتفاق می‌افتد، اشاره نمود (شکل ۳-۳) [۲۸].



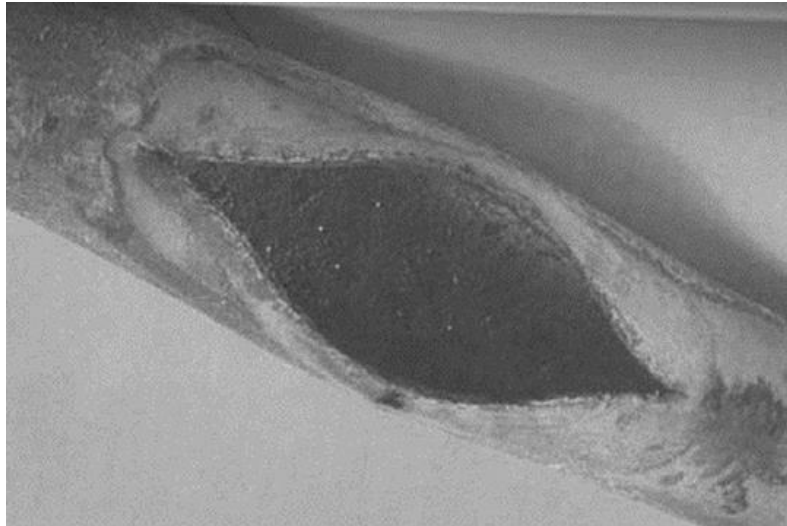
شکل ۳-۳) ایجاد شدن ترک در لیگامنتهای هدر سوپرهیتر [۲۸]

تغییر شکل خزشی تغییری در ضخامت دیواره لوله ایجاد نمی‌کند بلکه باعث افزایش طول و یا قطر لوله‌ها می‌شود. در خزش دمای بالا شکست به صورت طولی خواهد بود. در شکل ۳-۴، نمونه‌ای از این نوع شکست طولی نشان داده شده است [۲۹].



شکل ۳-۴) نمونه‌ای از شکست طولی مربوط به خزش دما بالا [۲۹]

وسعت تخریب و شکل ظاهری می تواند به صورت مختلفی باشد. تخریب کوچک به شکل تاول باز شده و تخریب بزرگ به صورت خیلی پهن، دهانه باز، شبیه دهانه ماهی ظاهر می شود. شکل ۳-۵، نمونه‌ای از آسیب خزشی از نوع دهان ماهی را نشان می‌دهد [۲۳].



شکل ۳-۵) نمونه‌ای از آسیب خزشی به شکل دهان ماهی [۲۳]

پارگی از نوع لبه کلفت و در همسایگی پارگی اصلی، ترک های ثانوی زیادی نیز دیده می شود. سطح داخل از اکسید سخت و ضخیم پوشیده شده که با شکست آن، شیار V شکل تولید میشود. ظاهر لوله شبیه پوست تمساح است. اورهیت بلندمدت معمولاً ناحیه ای از سطح لوله های بویلر را در بر می گیرد و روی یک لوله خاص به ندرت اتفاق می افتد.

تمیز کاری شیمیایی و حذف رسوبات داخلی جهت کاهش دمای لوله ها در رفع این عیب مؤثر است. استفاده از آلیاژهایی با گرید بالا و مقاوم در برابر خزش در محلی که دما بسیار بالا می رود، ضروری است. روش های تکمیلی نظیر اعمال پوشش اسپری فلزی، نصب حفاظ و عایق حرارتی باعث کاهش سرعت نازک شدن لوله ها به دلیل خوردگی یا سایش می شود [۲۴].

پرامانیک و همکاران [۳۰] در بررسی های خود بر روی عوامل آسیب در لوله های سوپرهیتر ساخته شده از فولاد کروم-مولیبدنی نشان داده اند که رسوبات ایجاد شده مانع انتقال حرارت و در نتیجه افزایش نامطلوب

دما (اورهیت) می‌شوند. گرمای موضعی ایجاد شده سبب درشت شدن کاربیدها و همچنین رسوب فازهای ترد جدید به مرزدانه‌ها شده که ترد شدن فولاد لوله‌ها را در پی دارد. یکی از عوامل ایجاد شدت رسوبات، کیفیت پایین آب ورودی است. از جمله منابع ناخالصی‌ها به آب، می‌توان به آسیب لوله‌های کندانسور اشاره کرد که سبب ورود غلظت بالایی از نمک به آب می‌شود.

۳-۳) رفتگی

رفتگی (erosion) یک پدیده مکانیکی است که طی آن ذرات جامد با سرعت بالا با سطح فلز برخورد می‌کنند. در طی فرآیند رفتگی، کاهش ماده از سطح جامد به طور منظم اتفاق می‌افتد. این پدیده به طور دائمی در لوله‌های بویلر و تیغه‌های توربین رخ می‌دهد. مجموع زیان اقتصادی ناشی از رفتگی در بویلرها سالانه برابر با ۱۵ میلیون دلار برآورد شده است [۳۱، ۳۲].

در جدول ۳-۱، مثال‌هایی از پدیده رفتگی در اجزای یک نیروگاه بخار آورده شده است.

جدول ۳-۱) برخی مثال‌ها در مورد آسیب رفتگی اجزای نیروگاه بخار

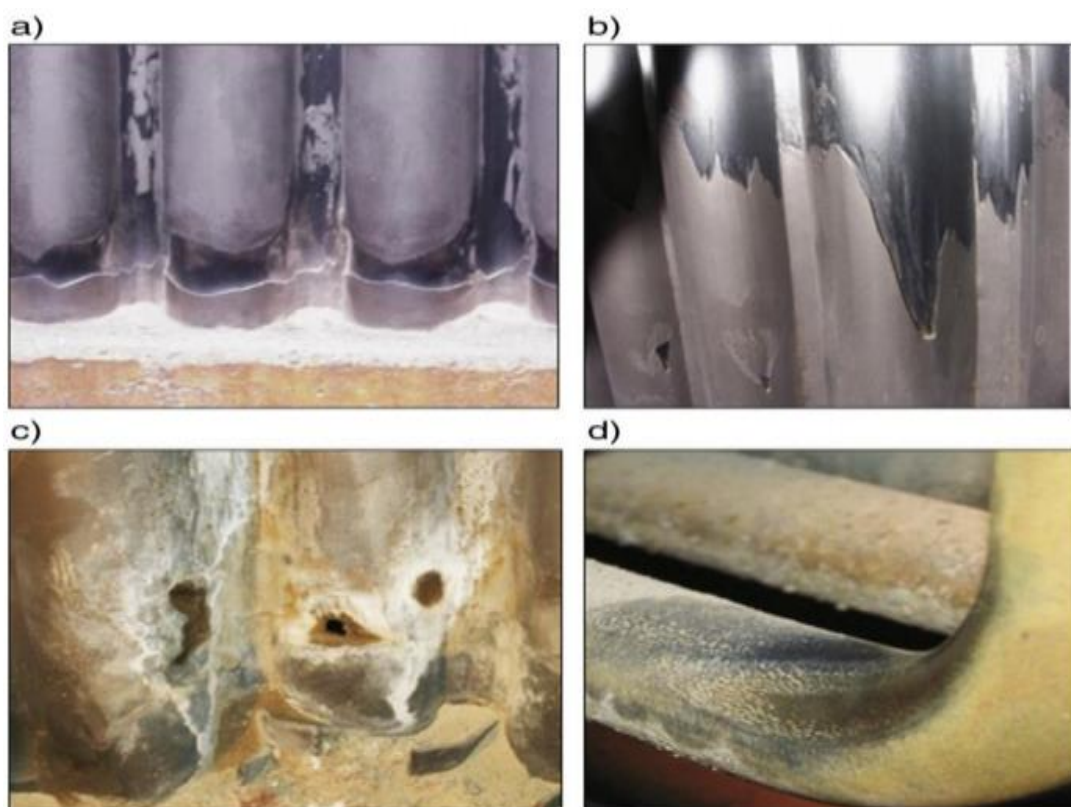
علت خرابی سایشی	قطعه
خاکستری که در سوخت زغال سنگ وجود دارد	لوله‌های اکونومایزر
اکسیدهای خرد شده که از سوپرهیتر وارد می‌شود	لوله‌های ورودی توربین و نازل‌ها
قطرات آب موجود در بخار	پره‌های توربین LP

لایه‌های اکسیدی خرد شده موجود در لوله‌های بویلر می‌تواند به جریان بخار ورودی به توربین راه یابد که در نتیجه آن رفتگی تیغه‌های توربین و نازل‌ها اتفاق می‌افتد. مکان این آسیب‌ها در لبه‌های تیغه‌های HP/LP جلویی و زیر پوشش تیغه‌هاست.

مکانیزم رفتگی تابعی از پارامترهایی همچون زاویه برخورد، خواص مواد، سرعت، غلظت، اندازه و شکل ذرات و نیز دما می‌باشد. مواد ترد هنگامی که ذرات با زاویه عمود به آن‌ها برخورد می‌کنند بیش‌ترین نرخ رفتگی را داشته و هنگامی که زاویه برخورد تقریباً ۲۰ درجه باشد، بهترین عملکرد را به لحاظ رفتگی دارند. برعکس، موادی با فاز داکتیل کمترین مقاومت به رفتگی را در زاویه برخورد ۲۰ درجه و بیش‌ترین مقاومت را در زاویه برخورد نرمال از خود نشان می‌دهند [۳۳].

پراکاش و همکاران گزارش داده‌اند که حدود ۵۶/۱۸ درصد از خرابی‌های نیروگاه‌ها مربوط به رفتگی و خوردگی داغ می‌شود. از این رو می‌توان گفت که آسیب ناشی از رفتگی سهم قابل توجهی از خرابی‌های بویلر را به خود اختصاص می‌دهد [۳۴].

در شکل ۳-۶، مثال‌هایی از خرابی‌های ایجاد شده در لوله‌های بویلر نشان داده شده است.



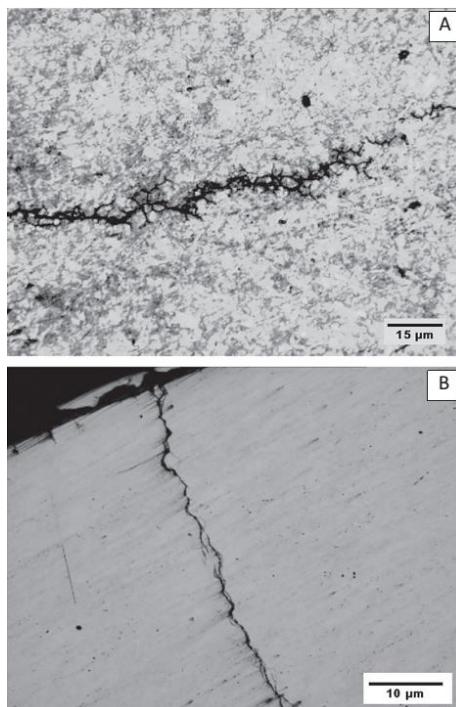
شکل ۳-۶) مثال‌هایی از آسیب رفتگی در لوله‌های بویلر: (a) ناحیه اطراف بست‌های سرامیکی، (b) منطقه میانی در پوشش -

های اسپر حرارتی، (c) آسیب ناشی از رفتگی دیواره و (d) آسیب در لوله سوپرهیتر [۳۴]

۴-۳) ایجاد ترک خوردگی-تنشی

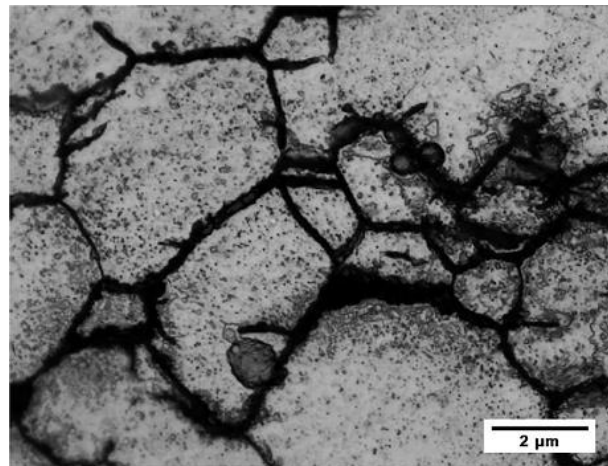
دو عامل مهم در کنترل پدیده ترک تنشی-خوردگی (SCC) در بویلرها نقش دارند. فلز ابتدا باید در آن منطقه تحت تنش‌های کششی به مقدار کافی قرار بگیرد. این تنش‌ها ممکن است از نوع تنش اعمالی و یا باقیمانده باشند. فاکتور مهم بعدی وجود غلظت مناسبی از خوردنده‌های ویژه در مناطقی است که تحت تنش قرار گرفته‌اند. خوردنده‌های ویژه برای فولادهای کربنی، هیدرواکسید سدیم و برای فولادهای زنگ زن می‌تواند هیدرواکسید سدیم و یا انواع کلریدها باشد [۲۴].

در بررسی صورت گرفته توسط آناندا رائو و همکاران [۳۵] بر روی عوامل ایجاد و رشد ترک تنشی-خوردگی در فولاد آستنیتی ۳۱۶L نشان داده شد که این ترک‌ها از آسیب حفره‌دار شدن سطح خارجی به علت حضور یون‌های کلرایدی ایجاد شده‌اند. رنجبر [۳۶] گزارش داده است که حضور ناخالصی‌هایی همچون سدیم اضافی درون آب ورودی می‌تواند حفره‌دار شدن و خوردگی تنشی را به دنبال داشته باشد. شکل ۳-۷ ایجاد ترک خوردگی تنشی و شاخه‌دار شدن آن را در سطوح خارجی لوله نشان می‌دهد.



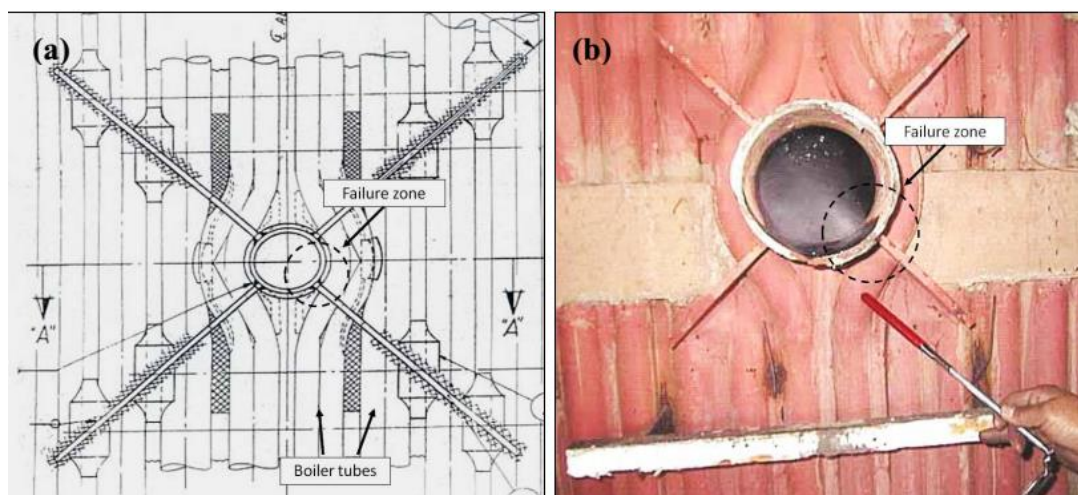
شکل ۳-۷) تصویر از (A) ترک شاخه‌دار شده در سطح خارجی و (B) ترک در حالتی که نمونه اچ نشده است [۳۵]

جهت رشد ترکها می تواند در چند شاخه و یا در یک شاخه در جهت عمود بر تنش کششی اتفاق بیافتد. همچنین این ترکها بین دانه‌ای بوده و هیچگونه تغییر شکل پلاستیکی در اطراف این ترکها وجود ندارد (شکل ۳-۸).



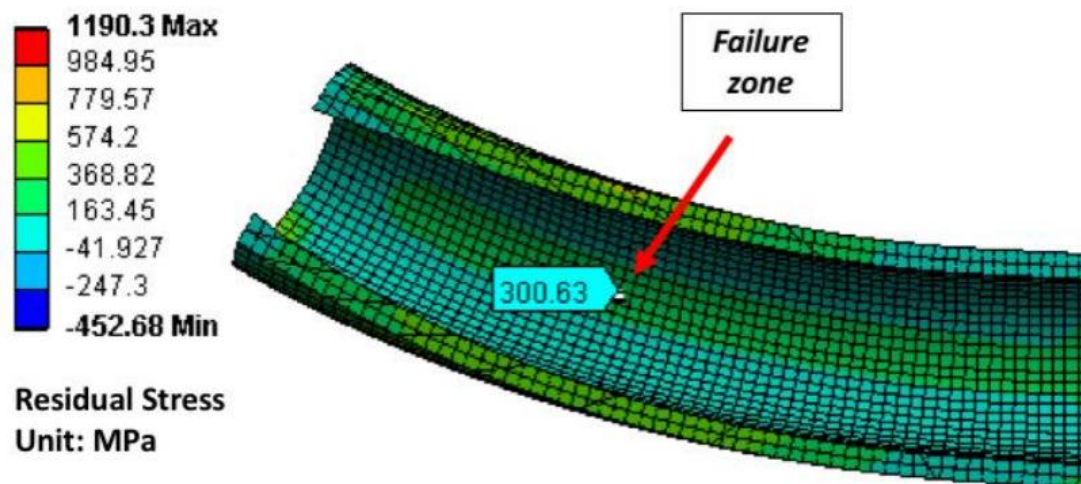
شکل ۳-۸) تصویر میکروسکوپ نوری از سطح خارجی لوله حاوی ترکهای بین دانه‌ای [۳۵]

در تحقیق دیگری، دورانه و همکاران [۳۷] علل آسیب ترک تنشی-خوردگی در یک لوله اوپوریتور را مورد مطالعه قرار داده‌اند. موقعیت این لوله و آسیب وارده در شکل ۳-۹، نشان داده شده است.



شکل ۳-۹) تصویر (a) شکل شماتیک لوله آب بویلر را به همراه منطقه آسیب نشان می‌دهد و (b) تصویر ماکرو از لوله آب بویلر که منطقه ترک را در لوله نشان می‌دهد [۳۷].

برای بررسی کمی تنش‌های باقیمانده ناشی از خمش لوله (در حین ساخت) از روش المان محدود استفاده شد (شکل ۳-۱۰).



شکل ۳-۱۰ تعیین تنش‌های باقیمانده ناشی از خمش لوله با استفاده از روش المان محدود [۳۷]

نتایج این بررسی نشان داد که تنش کششی باقیمانده ناشی از ضعف مرحله تنش زدایی به همراه حضور اکسیژن حل شده در آب ورودی اصلی‌ترین عامل ایجاد آسیب ترک تنشی-خوردگی محسوب می‌شوند.

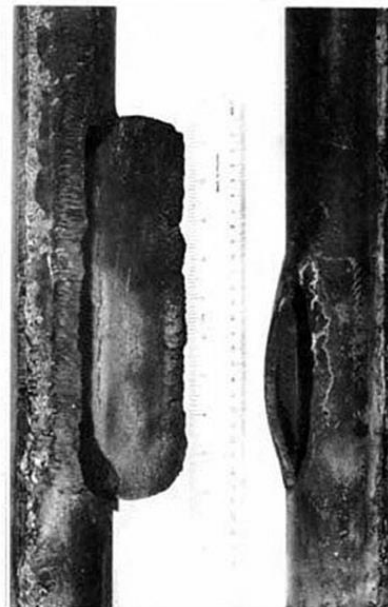
روش‌های کنترل این آسیب، بستگی به حساسیت و بزرگی ترک‌های ناشی از خوردگی دارند. مقاطع لوله‌های سوپرهیتر حساس به SCC، در صورت آلوده شدن در زمان تمیزکاری شیمیایی بویلر، باید تعویض شوند. عملیات حرارتی در خمها و قسمت‌های جوشکاری شده باعث کاهش تنش‌های کششی می‌شود. استفاده از فولادهای آستنیتی پایدار شده، حساسیت فولاد در برابر این عیب را نیز کاهش می‌دهند [۳۷].

۵-۳) آسیب هیدروژنی

در بررسی آسیب‌های وارد شده به اجزای مختلف بویلر، مشاهده شده است که انواع مختلف خرابی‌ها با حضور و موضعی شدن هیدروژن در فلز همراه بوده است. آسیب هیدروژنی به سبب کاهش pH در آب تغذیه ظاهر می‌شود که این امر از طریق ورود نمک‌های اسیدی بخاطر نشتی کندانسور، باقی ماندن آلودگی در تمیزکاری

شیمیایی با عملکرد نامناسب سیستم های کنترل شیمی آب و تغلیظ آلودگی در درون رسوبات صورت می گیرد. یکی از منابع تولید رسوب، وجود محصولات خوردگی در آب سیکل می باشد.

اگر اتم هیدروژن با فاز کاربیدی Fe_3C در دیواره لوله واکنش دهد، متان (CH_4) تولید می شود: $4H + Fe_3C = CH_4 + 3Fe$. نفوذ گاز متان کم بوده و در نتیجه در مرزهای دانه تجمع می یابد. فشار گاز متان در مرزدانه به آرامی افزایش می یابد تا اینکه از استحکام مرزدانه بیش تر شود. در نتیجه این فرآیند، ریزترک های ناپیوسته و تصادفی حاصل می شوند. آسیب هیدروژنی به صورت شکاف پنجره ای و پارگی دیواره کلفت می باشد (شکل ۳-۱۱).



شکل ۳-۱۱) آسیب هیدروژنی به صورت شکاف پنجره ای و پارگی دیواره [۳۸]

علاوه بر وجود رسوب در سطح تخریب، ممکن است لایه رسوب ضخیمی هم در سطوح داخلی دیده شود. البته مکانیزم های دیگری نیز از جمله تشکیل هیدریدها، مکانیزم جدایش تقویت شده با هیدروژن و مدل تغییر شکل پلاستیک موضعی تقویت شده با هیدروژن نیز برای آسیب هیدروژنی پیشنهاد شده است. برای مثال، در مکانیزم جدایش تقویت شده با هیدروژن، اتم های هیدروژن باعث کاهش استحکام چسبندگی در نوک ترک می شوند. در مدل تغییر شکل پلاستیک موضعی نیز تجمع هیدروژن در نزدیکی نوک ترک سبب

کاهش مقاومت ماده نسبت به حرکت نابجایی‌ها می‌شود. این امر تغییر شکل پلاستیک ماده را در اطراف نوک ترک به دنبال دارد [۳۸].

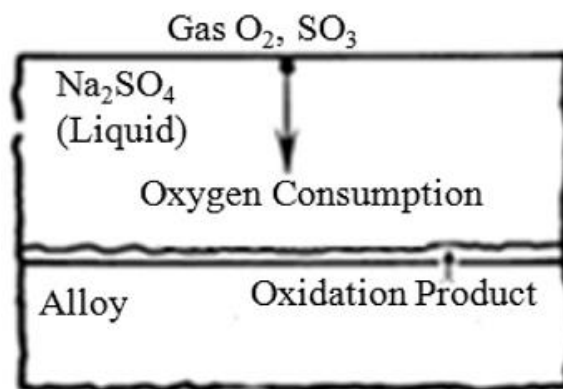
۳-۶ خوردگی دمای پائین یا خوردگی انتهای سرد تجهیزات بویلر

خوردگی دمای پائین در موقعیت‌های زیر در اکونومایزر می‌تواند رخ دهد:

- محلی که دمای لوله‌های اکونومایزر کمتر از نقطه شبنم اسید باشد در این حالت اسید سولفوریک رقیق روی سطح لوله‌ها تقطیر می‌شود،

- محلی که دمای محصولات احتراق کمتر از نقطه شبنم اسید باشد که این امر نیز باعث تقطیر ذرات پراکنده خاکستر می‌شود.

این نوع خوردگی به وسیله تقطیر اسید سولفوریک موجود در محصولات احتراق ایجاد می‌شود. در شکل ۳-۱۲، نمایی از این فرآیند خوردگی نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۲ شماتیک فرآیند خوردگی دما پائین [۴۱]

تری اکسید سولفور با رطوبت و یا بخار ترکیب شده و اسید سولفوریک تولید می‌کند. میزان تری اکسید سولفور (SO_3) بستگی به چگونگی فرآیند احتراق دارد. با افزایش SO_3 ، نقطه شبنم زیاد می‌شود. SO_3 می‌تواند با نمک ($NaCl$) و بخار آب واکنش داده و Na_2SO_4 را تشکیل دهد. خوردگی دمای پائین بویلرها با سوخت مایع بدلیل وجود وانادیم به عنوان کاتالیست، نسبت به سوخت زغال سنگ بیشتر مشاهده می‌شود. وانادیم عموماً

به صورت اکسید با ترکیب V_2O_5 در گاز احتراقی موجود است که می‌تواند در واکنش با Na_2SO_4 سدیم وانادایت را با دمای ذوب کم ایجاد کند. سدیم وانادایت ماده‌ای بسیار خورنده در موادی با دماهای بالاست.

دلایل اصلی خوردگی دمای پائین می‌تواند به وسیله اندازه گیری نقطه شبنم اسید مورد بررسی قرار بگیرد. نقطه شبنم مستقیماً با میزان SO_3 تغییر می‌کند. با اندازه گیری دمای فلز و گاز می‌توان دریافت که در شرایط مختلف کاری بویلر، لوله‌های اکونومایزر در چه وضعیتی به لحاظ خوردگی قرار دارند [۳۹-۴۱].

خوردگی دمای پائین با کاهش ضخامت لوله‌ها، باعث گسیختگی از نوع داکتیل در فولاد می‌شود. به دلیل عدم توانایی انتقال بار بیش از حد مجاز در فولاد، شکست لبه نازک ظاهر می‌شود. خوردگی در سطح خارجی باعث زبری سطح شده که نشان دهنده فعالیت شدید خوردگی می‌باشد.

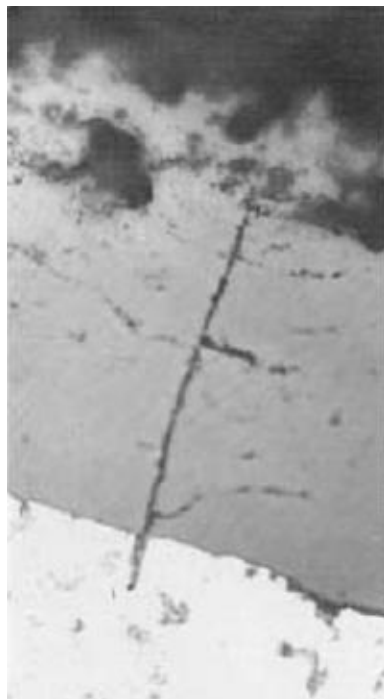
روش‌های کنترل این نوع خوردگی شامل افزایش دمای فلز و محصولات احتراق نسبت به نقطه شبنم یا پائین آوردن نقطه شبنم با کاهش هوای اضافه به همراه افزودنیهای سوخت، می‌باشند. کاهش میزان SO_3 در محصولات احتراق به وسیله کنترل افزایش اکسیژن اضافی زیر یک درصد یا بوسیله تزریق افزودنی‌های سوخت با پایه اکسید منیزیم در سمت آتش می‌تواند در جلوگیری از خوردگی دمای پائین مفید واقع شود. اما این کار برای بعضی بویلرها امکان پذیر نیست. تزریق مواد افزودنی به سوخت قبل از این که بخواند در بویلر به مصرف برسد، صورت می‌گیرد. استفاده از یک مسیر برگشتی آب جهت افزایش دمای سطح لوله‌ها و در نتیجه کاهش خوردگی نقطه شبنم نیز می‌تواند مفید واقع شود [۳۹].

۷-۳) آسیب خستگی-خوردگی

آسیب خستگی-خوردگی می‌تواند در هر مکانی که تنش‌های سیکلی در آن به شدت کافی وجود دارد، رخ دهد. شروع به کار سریع بویلر و نیز خاموش کردن سریع آن می‌تواند حساسیت بویلر را به آسیب خستگی-خوردگی افزایش دهد. در نتیجه با کنترل بهینه شروع و خاموش کردن بویلر می‌توان از وقوع این آسیب

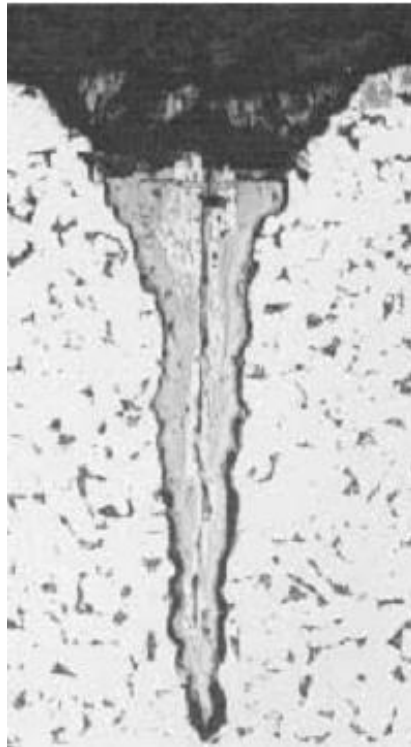
جلوگیری کرد. اصطلاح خستگی-خوردگی به انتشار ترک در فلز بر اثر تنش‌های سیکلی در یک محیط خوردنده اشاره دارد. مراحل انتشار ترک را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

- هنگام طی شدن فاز اول تنش‌های سیکلی، دیواره لوله دچار انبساط می‌شود. از آنجایی که لایه رسوبی تردتر از دیواره لوله است، امکان شکسته شدن لایه اکسیدی وجود دارد. این امر باعث ایجاد و باز شدن ریزترک‌هایی از میان لایه اکسیدی به سمت سطح فلز می‌شود.
- سطح فلز پایه در محل ریشه ترک اکسید می‌شود و یک شیار میکروسکوپی را در سطح فلز ایجاد می‌کند (شکل ۳-۱۳).



شکل ۳-۱۳) شروع فرآیند ایجاد شدن ترک خستگی-خوردگی [۲۴]

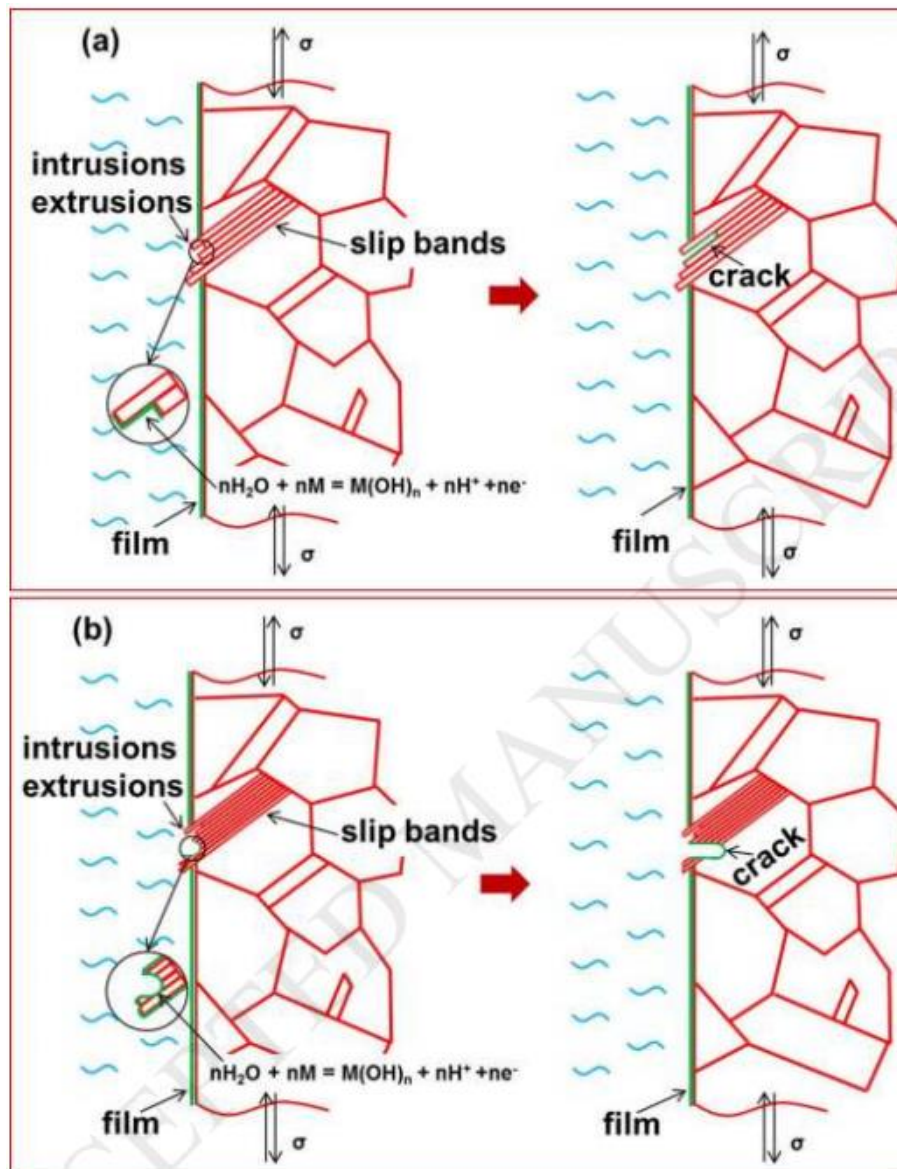
- در طی سیکل بعدی انبساط، این اکسید در راستای شیار ایجاد شده شکسته شده و باعث عمیق‌تر شدن آن می‌شود.
- با ادامه این چرخه سیکلی، ترک گوه‌ای شکل در میان دیواره لوله انتشار می‌یابد (شکل ۳-۱۴).



شکل ۳-۱۴) انتشار ترک خستگی-خوردگی [۲۴]

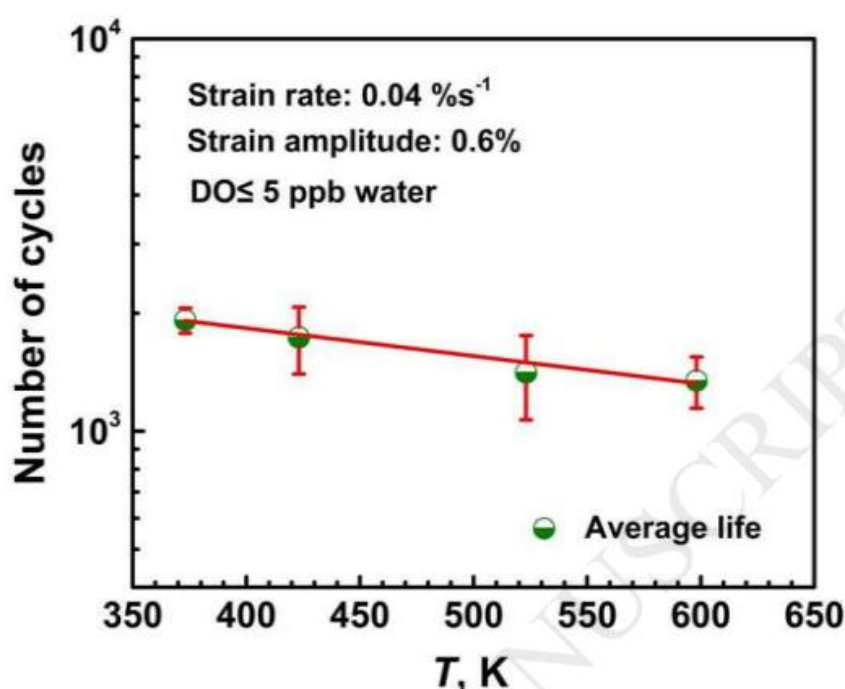
منشاء تنشها ممکن است در اثر اختلاف انبساط حرارتی بین دو قطعه به هم متصل شده از اجزاء مختلف با تمرکز تنش در محل حفره شیار و ناصافی های دیگر سطح باشد. محیط خورنده در اثر وجود اکسیژن حل شده یا شرایط اسیدی باعث ایجاد حفره و نهایتا در محل های با تنش های پسماند یا تنشهای سرویس، باعث ترک می شود [۲۴]. ابارا در این خصوص نقش حفره دار شدن را در فرآیند شروع ترک خستگی-خوردگی بسیار با اهمیت می داند. همچنین مطالعه او نشان می دهد که بیش تر عمر قطعات در معرض این آسیب، صرف ایجاد شدن ترک می شود. بر این اساس باید بیش ترین اهتمام در جهت شناخت عوامل مؤثر بر روی ایجاد ترک خستگی-خوردگی و جلوگیری از آنها به عمل آورده شود [۴۲].

در این راستا بررسی مهمی توسط ژانگ و همکاران [۴۳] در زمینه نقش عوامل مؤثر بر ایجاد ترک خستگی-خوردگی انجام شده است. در شکل ۳-۱۵ مراحل ایجاد شدن ترک، در دو حالت دما پایین و دما بالا به صورت شماتیک نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۵) مراحل ایجاد ترک خستگی-خوردگی در (a) دما پایین و (b) دما بالا [۴۳]

نتایج این بررسی‌ها نشان می‌دهد که عمر قطعات در معرض این آسیب با افزایش دما کاهش پیدا می‌کند. بر این اساس یک رابطه خطی بین عمر خستگی-خوردگی و دما پیشنهاد شده است (شکل ۳-۱۶).



شکل ۳-۱۶) نمودار مربوط به عمر خستگی-خوردگی بر حسب دما در آلیاژ ۳۱۶L [۴۳]

۳-۸) آسیب‌های جوشکاری

جوشکاری فولادها سبب تغییراتی در پایداری فازها، رسوب فازهای نامطلوب و یا تاخیر در استحاله فازی به سبب چرخه حرارتی جوشکاری می‌شود. بعلاوه، جوشکاری عموماً تنش‌های باقیمانده را در پی دارد که ممکن است سبب بروز آسیب در حین عملکرد سازه شود. همان‌گونه که در فصل قبل بیان شد، کروم عنصر اصلی در محافظت فولاد در برابر خوردگی محسوب می‌شود. از طرفی این عنصر به علت واکنش شدیدی که با اکسیژن و کربن دارد، فوق‌العاده به اکسیداسیون و جدا شدن از ساختار حساس است. این امر باعث ایجاد عیوب آخال اکسیدی و خروج کروم از فلز ذوب و منطقه HAZ در حین جوشکاری فولاد می‌شود. این مسئله کاهش مقاومت به خوردگی را در اتصالات جوشکاری شده به همراه دارد. در نتیجه، محدودیت‌هایی بابت حضور اکسیژن در جوشکاری فولادهای زنگ نزن وجود دارد. در جوشکاری GMAW¹ لازم است تا میزان گازهای

¹ Gas metal arc welding

پایدارکننده‌ای مانند اکسیژن و CO₂ به حدود ۰.۲٪ گاز محافظ محدود شود تا از کاهش عناصر آلیاژی جلوگیری به عمل آید. همچنین میزان اکسیژن در فلاکس حاصل از جوشکاری SAW^۱ و SMAW نیز باید کم باشد. هنگام جوشکاری پاس ریشه لوله‌ها ضروری است که با استفاده از گاز محافظ، از ناحیه پوشش داده نشده توسط گاز محافظ، محافظت شود. این امر کمک می‌کند تا از کاهش مقاومت به خوردگی در مناطق داخل جوش جلوگیری شود.

همچنین برای اطمینان از اتصالات جوشکاری شده استفاده از روش‌های کنترل کیفی زیر ضروری می‌باشد:

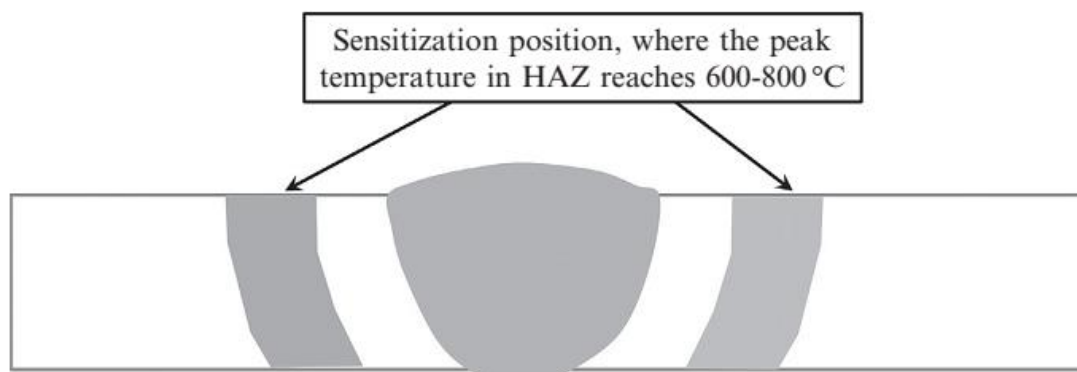
- صحیح بودن دستورالعمل جوشکاری، مهارت جوشکارها و اپراتورها
- استفاده از بازرسان خبره جوشکاری و انجام تست‌های غیر مخرب،
- کالیبره کردن تجهیزات جوشکاری و وسایل انجام دهنده تست‌ها
- مستندسازی روش‌های جوشکاری و تست‌های مربوطه [۴۴]

در ادامه به عیوب ناشی از جوشکاری به صورت موردی اشاره می‌شود.

۱-۸-۳) حساس شدن

این مشکل سبب حمله شدید به مناطق جوشکاری شده می‌شود. هنگامی که فولاد بر اثر جوشکاری تا دماهای ۵۰۰ تا ۸۵۰°C حرارت می‌بیند، کربن با کروم ترکیب شده و کاربیدها را شکل می‌دهند. این ذرات کاربیدی تمایل دارند تا در مرزدانه‌ها تشکیل شوند که این امر منجر به خالی شدن مناطق اطراف از کروم می‌شود. این مسئله، کاهش موضعی مقاومت به خوردگی را در پی دارد. به این فرآیند در اصطلاح، حساس شدن فولاد گفته می‌شود. این آسیب هنگام جوشکاری در مناطق HAZ رخ می‌دهد (شکل ۳-۱۷)

¹ Submerged arc welding



شکل ۳-۱۷) حساس شدن در منطقه HAZ [۴۴]

سه روش برای جلوگیری از حساس شدن پیشنهاد شده است:

- استفاده از فولادهای کم کربن مانند ۳۰۴L، ۳۱۶L و ۳۱۷L. مقدار کربن در این آلیاژها به حدی پایین است که نمی‌تواند با کروم واکنش دهد.
- استفاده از فولادهای زنگ نزن پایدار مانند ۳۲۱ و ۳۴۷ که حاوی عناصر آلیاژی (مانند Ti و Nb) هستند که تمایل شیمیایی بیشتری نسبت به کربن جهت واکنش با کربن دارند.
- انجام عملیات حرارتی بر روی اتصالات جوش در محدوده دمایی ۱۰۵۰ تا ۱۱۰۰°C که باعث حل شدن کاربیدهای کروم می‌شود [۴۵].

۳-۸-۲) ایجاد ترک خوردگی-تنشی

این آسیب از ترکیب تنش‌های تنشی و شرایط خورنده حاصل می‌شود. حضور یون‌های هالوژن مانند کلرایدها عموماً با این آسیب همراه هستند. وجود تنش‌های باقیمانده جوشکاری نقش بسیار مهمی در اینگونه آسیب‌ها ایفا می‌کند. در نتیجه، عملیات تنش‌زدایی راه‌حل مهمی در جلوگیری از این عیب محسوب می‌شود.

۳-۸-۳) ترک خوردن

عوامل زیادی در ایجاد شدن ترک در جوش فولادهای زنگ نزن نقش دارند. ترک خوردن ناشی از هیدروژن عموماً در فولادهای فریتی و مارتنزیتی رخ می‌دهد. فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی پایدار شده عموماً دچار ترک خوردگی منطقه HAZ پس از عملیات جوشکاری و نیز ترک خوردن بازگرمایشی در حین سرویس می‌شوند. عیب نخست ناشی از تشکیل ترکیباتی با نقطه ذوب پایین در مرزدانه و عیب دوم ناشی از رسوب‌سختی درون دانه‌هاست. هر دو این مکانیزم‌ها توسط افزودن عناصر پایدارکننده قابل کنترل هستند.

۴-۸-۳) ترک ناشی از انجماد

ترک ناشی از انجماد عموماً در مناطق وسط فلز جوش رخ می‌دهد. این آسیب ناشی از دو عامل است: حضور ناخالصی‌های سولفوری و فسفوری، و پس زده شدن آن‌ها به سمت مرزهای دانه که در آن‌جا فازی با دمای ذوب پایین را تشکیل می‌دهند. این فاز بر اثر تنش‌های کششی ایجاد شده در حین انقباض انجمادی برش می‌خورند [۶].

نتیجه گیری

در این گزارش سعی شد تا با بروز رسانی منابع موجود در زمینه تجهیزات بویلر، فولادهای به کار رفته در لوله‌های بویلر و آسیب‌های وارده به لوله‌های بویلر، گامی در جهت شناخت بهتر اصول فنی و متالورژیکی حاکم بر عملکرد بویلرها برداشته شود. در این بخش خلاصه موارد مهمی که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته آورده شده است.

- فولادهای به کار رفته در بویلرها اغلب از نوع زنگ نزن هستند. ساختار فولادهای زنگ نزن بر پایه پایداری فازهای فریت، آستنیت و مارتنزیت در ریزساختار است.
- فولادهای دوفازی در مقایسه با فولادهای فریتی، استحکام و مقاومت به خوردگی بسیار خوبی از خود نشان می‌دهند و از طرف دیگر در مقایسه با فولادهای آستنیتی، مقاومت بهتری نسبت به ایجاد ترک خوردگی-تنشی دارند. با این وجود، استفاده از آن‌ها محدود به دماهای زیر 250°C (برای سازه‌های جوشکاری شده) و زیر 300°C (برای سایر سازه‌ها) می‌شود تا از رسوب فازهای نامطلوب جلوگیری شود.
- با وجود مقاومت به خزش بالای فولادهای فریتی، استحکام این فولادها در حین سرویس تا حدود زیادی به رسوبات ریز درون میکروساختار بینیتی وابسته است.
- فولادهای آستنیتی به جهت داشتن شبکه کریستالی FCC در مقایسه با شبکه کریستالی BCC فولادهای فریتی، ضریب نفوذ در خود کمتری نسبت به فولادهای فریتی دارند. از این رو، مقاومت خزشی فولادهای آستنیتی عموماً بالاتر از فولادهای فریتی است.
- فولادهای مارتنزیتی به علت مقاومت خزشی بالا، مقاومت به خوردگی خوب و قابلیت تولید عالی، مهمترین مواد جهت استفاده در سوپرهیترها و ری‌هیترها محسوب می‌شوند. در این سه فولاد ذکر شده، استحاله مارتنزیتی باعث ایجاد دانسیته بالایی از نابجایی‌ها می‌شود که این امر استحکام زیادی را به فولادها می‌بخشد.

- روش‌های معمول بازرسی غیر مخرب همانند التراسونیک تنها پس از گذشت حدود ۷۰ تا ۸۰ درصد عمر فولادهای مارتنزیتی قادر به تشخیص حفره‌زایی خزشی هستند. یکی از دلایل این مسئله این است که در این فولادها برخلاف فولادهای فریتی کم آلیاژ، تغییراتی مانند کروی شدن و یا شکسته شدن ریزساختار در مقیاس قابل مشاهده با میکروسکوپ نوری یا الکترونی روبشی (SEM) رخ نمی‌دهد.
- تقریباً ۹۰ درصد آسیب‌ها ناشی از اورهیت بلند مدت در سوپرهیتورها، ری‌هیتورها و لوله‌های دیواره رخ می‌دهد. همچنین این آسیب در اکونومایزر به ندرت اتفاق می‌افتد.
- تغییر شکل خزشی تغییری در ضخامت دیواره لوله ایجاد نمی‌کند بلکه باعث افزایش طول و یا قطر لوله‌ها می‌شود. در خزش دمای بالا شکست به صورت طولی خواهد بود. وسعت تخریب و شکل ظاهری می‌تواند به صورت‌های مختلفی باشد. تخریب کوچک به شکل تاول باز شده و تخریب بزرگ به صورت خیلی پهن، دهانه باز، شبیه دهانه ماهی ظاهر می‌شود.
- مکانیزم رفتگی تابعی از پارامترهایی همچون زاویه برخورد، خواص مواد، سرعت، غلظت، اندازه و شکل ذرات و نیز دما می‌باشد. مواد ترد هنگامی که ذرات با زاویه عمود به آن‌ها برخورد می‌کنند بیش‌ترین نرخ رفتگی را داشته و هنگامی که زاویه برخورد تقریباً ۲۰ درجه باشد، بهترین عملکرد را به لحاظ رفتگی دارند. برعکس، موادی با فاز داکتیل کمترین مقاومت به رفتگی را در زاویه برخورد ۲۰ درجه و بیش‌ترین مقاومت را در زاویه برخورد نرمال از خود نشان می‌دهند.
- تنش کششی باقیمانده ناشی از ضعف مرحله تنش زدایی به همراه حضور اکسیژن حل شده در آب ورودی اصلی‌ترین عامل ایجاد آسیب ترک تنشی-خوردگی محسوب می‌شوند.
- شروع به کار سریع بویلر و نیز خاموش کردن سریع آن می‌تواند حساسیت بویلر را به آسیب خستگی-خوردگی افزایش دهد. در نتیجه با کنترل بهینه شروع و خاموش کردن بویلر می‌توان از وقوع این آسیب جلوگیری کرد.

- بیشتر عمر قطعات در آسیب خستگی-خوردگی، صرف ایجاد شدن ترک می‌شود. بر این اساس باید

بیشترین اهتمام در جهت شناخت عوامل مؤثر بر روی ایجاد ترک خستگی-خوردگی و جلوگیری از

آنها به عمل آورده شود.

مراجع

- 1) Steam/its generation and use. 41st edition. Editors: John B. Kitto and Steven C. Stultz. The Babcock & Wilcox Company, Barberton, Ohio, U.S.A. 2005, Chapter 1: Steam generation-An overview
- 2) Steam/its generation and use. 41st edition. Editors: John B. Kitto and Steven C. Stultz. The Babcock & Wilcox Company, Barberton, Ohio, U.S.A. 2005, Chapter 19: Boilers, Superheaters and Reheaters
- 3) Steam/its generation and use. 41st edition. Editors: John B. Kitto and Steven C. Stultz. The Babcock & Wilcox Company, Barberton, Ohio, U.S.A. 2005, Chapter 20: Economizers and Air heaters
- 4) Sathyanathan V.T, "Bi drum and single drum boiler compared", www.brighthubengineering.com, April 2013
- 5) Shibli, A. "Boiler steels, damage mechanisms, inspection and life assessment." Power Plant Life Management and Performance Improvement. 2011. 272-303.
- 6) El-Mahallawi, Iman, et al. "Welding-associated failures in power boilers." Handbook of Materials Failure Analysis with Case Studies from the Chemicals, Concrete and Power Industries. 2016. 387-410.
- 7) A. Almazrouee, R.K. Singh Raman, K. Al-Fadhalah, M. Alardhi, M. Alenezi, Role of oxide notching and degraded alloy microstructure in remarkably premature failure of steam generator tubes, Eng. Fail. Anal. 18 (8) (2011) 2288 –2295.
- 8) Abe, F. "Development of creep-resistant steels and alloys for use in power plants." Structural Alloys for Power Plants. 2014. 250-293.
- 9) Dobrzański, J., Adam Hernas, and Grzegorz Moskal. "Microstructural degradation in boiler steels: materials developments, properties and assessment." Power Plant Life Management and Performance Improvement. 2011. 222-271.
- 10) Saad Abouelazm A, El Mahallawi I, Abdel karim R, Rashad R. Failure investigation of secondary super-heater tubes in a power boiler. J Eng Fail Anal 2009, 433-448
- 11) R. Viswanathan, S.M. Gehl, Life-assessment technology for power-plant components, JOM 44 (2) (1992) 34 –42
- 12) S. Srikanth, B.R. Kumar, S.K. Das, K. Gopalakrishna, K. Nandakumar, P. Vijayan, Analysis of Failures in Boiler Tubes due to Fireside Corrosion in a Waste Heat Recovery Boiler, Engg. Failure Analysis 10 (2003) 59 –66.

- 13) Abdulla I. Almazrouee, , Khaled J. Al-Fadhalah, Saleh N. Alhajeri, Sulaiman Alfahaid, High temperature corrosion of martensitic steel of reheater pipes in a desalination power plant, Engineering Failure Analysis 85 (2018) 89–96
- 14) Chang Y, Xu H, Ni Y. The effect of multiaxial stress state on creep behavior and fracture mechanism of P92 steel. Mater Sci Eng A 2015;636:70 –6.
- 15) Ennis, P. J., and A. Czyrska-Filemonowicz. "Recent advances in creep-resistant steels for power plant applications." Sadhana 28.3-4 (2003): 709-730.
- 16) Shibli A., 'Performance of P91 thick section welds under steady and cyclic loading conditions: power plant and research experience', OMMI, www.ommi.co.uk Vol1, Issue 3, December 2002.
- 17) Nonaka I, et al. 'Full size internal pressure creep test for welded P91 hot reheat piping', Special Issue, Int. J. Pressure Vessels and Piping, 84, Issues 1–2, January–February 2007, 88–96.
- 18) Igarashi M., Yoshizawa M., Iseda A., Matsuo H. and Kan T. 'Long-term creep strength degradation in T122/P122 steels for USC power plants', Proc.of 8th Liege conference on Materials for Advanced Power engineering 2006, Liege, Belgium 1095–1104.
- 19) F. Abe, Research and development of heat-resistant materials for advanced USC power plants with steam temperatures of 700°C and above, Engineering Vol.1, 2015, 211-224
- 20) Maruyama K, Sawada K, Jun-Ichi K. Strengthening mechanisms of creep resistant tempered martensitic steel. Trans Iron Steel Inst Japan 2007;41:641 –53.
- 21) Kubon Z, Foldyna V and Vodarek V, 'Optimised chemical composition of 9–12 %Cr steels with respect to maximum creep resistance', in Materials for Advanced Power Engineering 1998, Proceedings of the 6th Liege Conference, Liege, Belgium, Vol. 5, Part 1, p. 375.
- 22) Lamping GA, Arrowwood Jr. RM. Manual for Investigation and Correction of Boiler Tube Failures. Report CS-3945. Palo Alto: Electric Power Research Institute; 1985.
- 23) Saha, Atanu. "Boiler tube failures: Some case studies." Handbook of Materials Failure Analysis with Case Studies from the Chemicals, Concrete and Power Industries. 2016. 49-68.
- 24) Port Robert, D., and M. Herro Harvey. "The NALCO guide to boiler failure analysis. Nalco Chemical Company." (1991).

- 25) Abe. Grade 91 heat-resistant martensitic steel. In: A. Shibli, ed. Coal Power Plant Materials and Life Assessment: Developments and Applications. Cambridge, UK: Woodhead Publishing Limited, 2014: 3–51
- 26) A. Husain and K. Habib, Investigation of tubing failure of super-heater boiler from Kuwait Desalination Electrical Power Plant, Desalination, V 183, No. 1-3, (2005) 203-208.
- 27) B. R. Cardoso, F. W. Comeli, R. M. De Santana, H. C. Furtado, M. B. Lisboa and L. H. De Almeida, Microstructural degradation of boiler tubes due to the presence of internal oxide layer, Journal of Materials Research and Technology, V 1, No. 2, (2012) 109-116.
- 28) Cooper, M. A, “Managing Creep and Fatigue Life of Major Boiler Components in a Commercial Electricity Market”, EPRI/DOE Conference on Advances in Assessments and Optimisation of Fossil Power Plants, Orlando, Florida, March 2002
- 29) Saha, A. and Roy, H., 2017. Failure investigation of a secondary super heater tube in a 140 MW thermal power plant. Case studies in engineering failure analysis, 8, pp.57-60.
- 30) Pramanick, A. K., et al. "Failure investigation of super heater tubes of coal fired power plant." Case studies in engineering failure analysis 9 (2017): 17-26.
- 31) S.B. Mishra, S. Prakash, K. Chandra, Studies on Erosion Behavior of Plasma Sprayed Coatings on a Ni- Based Super Alloy, Wear 260 (2006) 422 –432
- 32) H. Singh, M.S. Grewal, H.S. Sekhon, R.G. Rao, Sliding Wear Performance of High-Velocity-Oxy-Fuel Spray Al₂O₃/TiO₂ and Cr₂O₃ Coatings, Engg. Tribology 222 (2008) 601 –610
- 33) Tijender, V.P. Sharma, G. Gupta, U. Sharma, V.N. Shukla, Mechanical degradation of various wear resistant nanostructured coating systems, International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science 4 (2016) 661-670
- 34) S. Prakash, S. Singh, B. S. Sidhu and A. Madeshia, Tube Failures in Coal Fired Boilers, Proc. National Seminar on Advances in Material and Processing, IITR, Roorkee, India, 2001, 245-253.
- 35) Rao, M. Ananda, R. Sekhar Babu, and MV Pavan Kumar. "Stress corrosion cracking failure of a SS 316L high pressure heater tube." Engineering Failure Analysis 90 (2018): 14-22.
- 36) K. Ranjbar, Failure analysis of boiler cold and hot reheater tubes, Engineering Failure Analysis, V 14, No. 4, (2007) 620-625.

- 37) Duarte, C.A., Espejo, E. and Martinez, J.C., 2017. Failure analysis of the wall tubes of a water-tube boiler. *Engineering Failure Analysis*, 79, pp.704-713.
- 38) Dwivedi SK, Vishwakarma M. Hydrogen embrittlement in different materials: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2018 Oct 25.
- 39) K. Natesan, Corrosion-Erosion behavior of materials in a coal-gasification environment, *Corrosion* (1976) 364 –370.
- 40) S. Srikanth, B.R. Kumar, S.K. Das, K. Gopalakrishna, K. Nandakumar, P. Vijayan, Analysis of Failures in Boiler Tubes due to Fireside Corrosion in a Waste Heat Recovery Boiler, *Engg. Failure Analysis* 10 (2003) 59 –66.
- 41) Abdulla I. Almazrouee, , Khaled J. Al-Fadhalah, Saleh N. Alhajeri, Sulaiman Alfahaid, High temperature corrosion of martensitic steel of reheater pipes in a desalination power plant, *Engineering Failure Analysis* 85 (2018) 89–96
- 42) Ebara R. Corrosion fatigue crack initiation in 12% chromium stainless steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2007 Nov 15;468:109-13.
- 43) Zhang Z, Tan J, Wu X, Han E, Ke W, Rao J, Effects of temperature on corrosion fatigue behavior of 316LN stainless steel in high-temperature pressurized water, *Corrosion Science*, 2018, Oct 30
- 44) Olson DL, Siewert TA, Liu S, Edwards GR. *ASM handbook, welding and brazing*, vol. 6. Materials Park, OH: ASM International; 1993, ISBN 0-87170-382-3(V.1).
- 45) James L. *The procedure handbook of arc welding*. 14th ed. Cleveland, OH: The James Lincoln Arc Welding Foundation; 2000