

به نام خدا



مرکز دانلود رایگان مهندسی متالورژی و مواد

www.Iran-mavad.com



Failure analysis of an auxiliary boiler water-wall tubes

Abstract

In this study, the failure of an auxiliary boiler water-wall tubes has been analyzed which their simultaneous failures after short-time working, resulted in malfunction and shutdown of the boiler for substituting the tubes. Visual inspections, chemical analysis and metallographic studies have been carried out on the received tubes. The corrosion products were analyzed using XRD and XRF. Also, an estimation of the local temperature of the tubes at the failure region was made. The results show that the long-time remaining of the water inside the tubes at the boiler out of work condition without any specific protection has been lead to severe corrosion of inner tube surfaces. Aggregation of the heavy corrosion products at the bend locations has activated concentration mechanisms resulted in local caustic corrosion and failure of the water- wall tubes.

Keywords: Caustic corrosion, failure analysis, water-wall tubes, structural analysis.

بررسی علل خرابی لوله های دیواره آبی بویلر کمکی

چکیده

در این تحقیق علل خرابی لوله های دیواره آبی یک بویلر کمکی متعلق به یکی از نیروگاه های بخاری، مورد بررسی قرار گرفته است که سوراخ شدن همزمان و سریع آنها پس از مدت بسیار کوتاه بهره برداری پس از تعویض لوله ها، سبب خروج از مدار بویلر و توقف کار به منظور تعویض مجدد بخش قابل ملاحظه ای از لوله های آن گردیده است. لوله های دریافت شده مورد بازرسی های چشمی، آزمون شیمیایی تعیین جنس و بررسی متالوگرافی قرار گرفته اند. همچنین بررسی های پراش و فلورسنس اشعه ایکس بر روی محصولات خوردگی داخل لوله ها انجام شده است. در انتها برای تعیین دمای موضعی لوله ها در موضع خرابی، به صورت تخمینی محاسبه گردیده است. نتایج بررسی ها نشان می دهد که باقی ماندن طولانی مدت آب داخل بویلر در شرایطی که بویلر خارج از مدار بوده، بدون اعمال شرایط نگهداری مشخص، سبب خوردگی شدید دیواره داخلی و تشکیل حجم قابل توجهی از رسوبات شده است. انبساط و انقباض بویلر در اولین راه اندازی موجب ریزش این رسوبات و تجمع آنها در لوله های خم دار پایین بویلر شده و شرایط تغلیظ را در زیر رسوب فراهم نموده است که منجر به خوردگی قلیایی موضعی و سوراخ شدن لوله ها گردیده است.

واژه های کلیدی: خوردگی قلیایی، تحلیل خرابی، لوله دیواره آبی، بررسی ساختاری.

مقدمه

چند نمونه لوله دیواره آبی^۱ تخریب شده مربوط به بویلر کمکی یکی از نیروگاه‌های بخار برای بررسی علل تخریب، دریافت شده است. طبق اظهارات کارشناسان نیروگاه، این نمونه‌ها مربوط به لوله‌های ردیف‌های آخر (سمت مقابل مشعل) در محل خم و نزدیک محل اتصال به درام پایین قرار داشته که سوراخ شدن آنها و خروج آب بویلر از محل سوراخ‌ها، سبب نقص در عملکرد لوله بویلر و عدم امکان ادامه سرویس‌دهی گردیده است.

قطر این لوله‌ها ۵۱ mm، فشار کاری آنها ۱۳/۸ bar و دمای اسمی آب داخل لوله‌ها ۲۴۹ °C بوده است. دبی آب ۲۰ ton/h و رژیم شیمیایی آن، فسفات هماهنگ با PH برابر با ۱۰/۵ گزارش شده است. عمر طراحی این لوله‌ها بیش از ۲۰ سال می‌باشد در حالی که لوله‌های مذکور فقط ۱/۵ سال از نصبشان می‌گذشته و در این مدت نیز به دلایل مختلف، مدت زمان‌های زیادی خارج از مدار بوده‌اند.

روش تحقیق

در ابتدا چند تکه برش خورده از لوله‌های تخریب شده دیواره آبی، تحویل گردید که نمای کلی دو نمونه از این لوله‌ها در شکل ۱ آورده شده است. برای تحلیل علل تخریب نمونه‌ها و جنبه‌های مختلف آن، بررسی‌های مختلفی بر روی لوله‌ها صورت گرفته است. ابتدا بازرسی‌های چشمی با چشم غیرمسلح و نیز دوربین عکاسی دیجیتال بر روی مقاطع مختلف لوله‌ها انجام شده است. در ادامه به کمک آنالیز کوانتومتری، ترکیب شیمیایی نمونه‌ها تعیین گردیده است. برای بررسی ماهیت محصولات خوردگی، از آنالیزهای پراش اشعه ایکس (XRD)^۲ و فلورسنس اشعه ایکس (XRF)^۳ استفاده شده است. تصاویر متالوگرافی از نواحی مختلف لوله تهیه و مورد ارزیابی قرار گرفته است و همچنین تخمینی ساده برای دمای موضعی لوله‌ها در محل تخریب، بدست آمده است. در ادامه نتایج حاصل از این بررسی‌ها، ارائه و بحث گردیده و در نهایت نتیجه‌گیری و چند پیشنهاد بیان شده است.



شکل ۱- نمای کلی دو نمونه از لوله‌های دریافت شده.

¹ Water wall tube

² X-Ray Diffraction

³ X-Ray Fluorescence

بازرسی چشمی

در مرحله اول، لوله‌ها بصورت چشمی و نیز به کمک دوربین عکاسی دیجیتال مورد بررسی ظاهری قرار گرفته‌اند. همانطور که شکل ۲ نشان می‌دهد، سوراخ‌ها و مناطق تخریب شده عموماً در ناحیه بیرونی لوله (شعاع خارجی انحنا) و در سمتی که شعله مستقیم به مشعل‌ها برخورد نمی‌کند، دیده می‌شود. تصاویر با بزرگنمایی بیشتر از سطوح خارجی لوله‌های آسیب دیده، سوراخ‌های متعدد و وجود آثار خوردگی و لایه‌های اکسیدی در مجاورت سوراخ‌ها را به وضوح نشان می‌دهد (شکل ۳).

برای بررسی بیشتر آثار تخریب رخ داده، لوله‌ها از چند ناحیه در جهات طولی و عرضی بریده شده‌اند. در تصاویر گرفته شده از سطوح داخلی نیز سوراخ‌ها، آثار خوردگی و رسوبات سطحی به وضوح دیده می‌شود (شکل ۴-الف). همچنین شکل ۴-ب مقطع لوله را در ناحیه‌ای نزدیک خم نشان می‌دهد که در آن حجم وسیعی از رسوبات داخل لوله، قابل رویت می‌باشد. این رسوبات تشکیل یک توده بزرگ را داده که در این ناحیه حدود ۴۰٪ از مساحت مقطع را اشغال کرده‌اند. لازم به ذکر است که مقدار قابل ملاحظه‌ای از این رسوبات هنگام برشکاری، بسته بندی و حمل و نقل ریخته است. نکته قابل ذکر دیگر این شکل ظاهری رسوبات نشان می‌دهد که این رسوبات در جای دیگری تشکیل شده و ضمن عبور از لوله‌ها در خم‌ها گیر کرده‌اند و به همین دلیل از استحکام بالا و چسبندگی زیادی به لوله برخوردار نیستند.

بوجود آمدن این حجم گسترده از رسوبات و محصولات خوردگی در داخل لوله طی زمان نسبتاً کوتاه بهره‌برداری از بویلر، طبیعی نبوده و می‌تواند ناشی عوامل تشدید کننده خوردگی مانند شرایط نگهداری غیر صحیح در هنگام خروج بویلر از مدار و یا شیمی نامناسب آب بویلر (تغییرات PH) باشد که در ادامه بیشتر به آن پرداخته خواهد شد.



(ب)

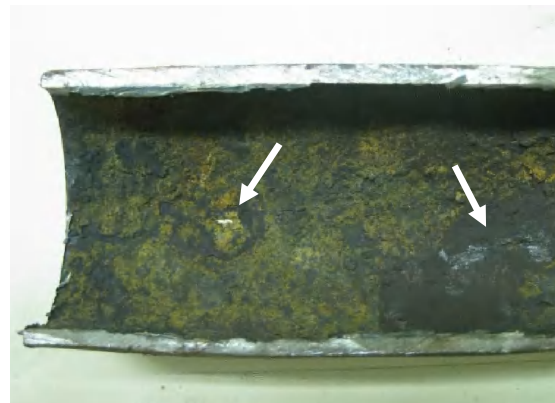


(الف)

شکل ۲- نمای بیرونی یک لوله تخریب شده: (الف) سمت برخورد شعله و (ب) سمتی که در مقابل شعله مستقیم قرار ندارد.



شکل ۳- سوراخ‌های ایجاد شده (نوک فلش) و لایه‌های اکسیدی در سطوح خارجی لوله‌های آسیب دیده.



شکل ۴- الف) آثار تخریب و خوردگی در سطوح داخلی لوله، ب) توده رسوبات درون لوله در مقطعی نزدیک خم.

بررسی جنس لوله ها

به منظور تعیین ترکیب شیمیایی فولاد بکار رفته در ساخت لوله های تخریب شده، از آنالیز کوانتومتری استفاده گردید که نتایج آزمون در جدول ۱ آورده شده است. بر این اساس، ترکیب شیمیایی این فولاد در محدوده ترکیب شیمیایی فولاد ASTM A210-Grade A-1 قرار می گیرد. این نوع فولاد مشابه فولاد استاندارد St 45.8 یا DIN 1.0405 می باشد که از دسته فولادهای با کربن متوسط بوده و عمدتاً در ساخت لوله های بی درز در بویلرها و سوپرهیتورها استفاده می شود [۱].

جدول ۱- نتیجه آنالیز شیمیایی لوله ها و ترکیب شیمیایی فولاد استاندارد ASTM A210-Grade A-1 [۱]

	C	Si	Mn	P	S
نتیجه آنالیز لوله ها	0.05	0.20	0.54	0.012	0.03
ASTM A210-Grade A-1	≤ 0.035	≤ 0.035	≤ 0.93	≥ 0.1	≤ 0.27

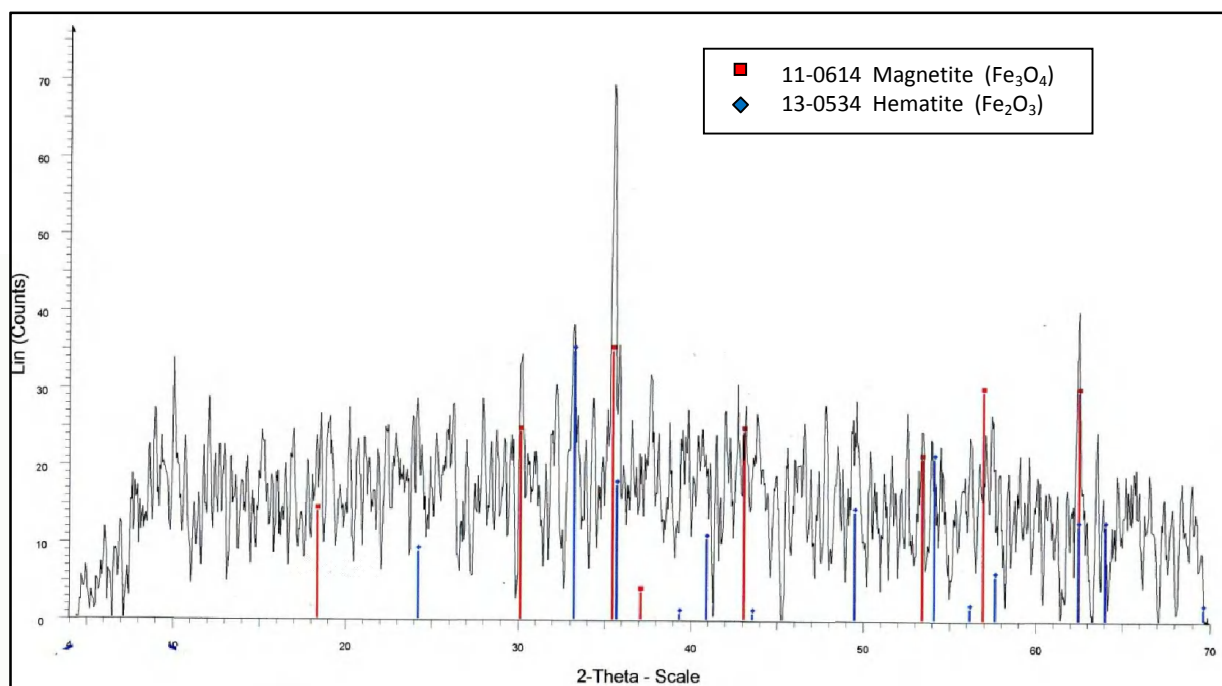
بررسی های اشعه ایکس

برای بررسی جنس و ماهیت رسوبات بر جای مانده در داخل لوله ها، از آنالیزهای پراش اشعه ایکس (XRD) و فلورسنس اشعه ایکس (XRF) استفاده شده که نتایج به ترتیب در شکل ۵ و جدول ۲ ارائه گردیده است. بر این اساس همانطور که انتظار می رفت، قسمت عمده این رسوبات از اکسیدهای آهن (Fe_2O_3 و Fe_3O_4) تشکیل شده است که ناشی از خوردگی و اکسید شدن آهن به عنوان عنصر پایه و اصلی بکار رفته در لوله های فولادی بویلر می باشد. این نتایج نشان می دهد که آهن به سادگی در شرایط اکسیداسیون قرار گرفته و سطح داخلی لوله ها را لایه ای از اکسید پوشانده است که احتمالاً در اثر انقباض و انبساط لوله ها هنگام راه اندازی و خاموش کردن جدا شده و ریخته است.

¹ XRD: X-Ray Diffraction

² XRF: X-Ray Fluorescence

جزء نسبتاً قابل توجه دیگری که در آنالیز XRF مشخص شده، اکسید مس با مقدار ۳/۶ درصد وزنی می باشد. اگرچه منشاء ورود اکسید مس به رسوبات، به درستی مشخص نیست لیکن وجود یون مس در آب بویلر می تواند طبق واکنش زیر، فرایند خوردگی فولاد بویلر را تسریع نماید [۲]:



شکل ۵- الگوی پراش و نتایج آزمون XRD بر روی رسوبات.

جدول ۲- نتیجه آنالیز XRF بر روی رسوبات

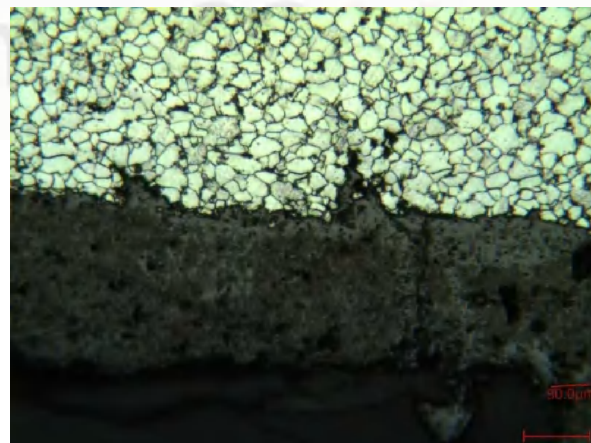
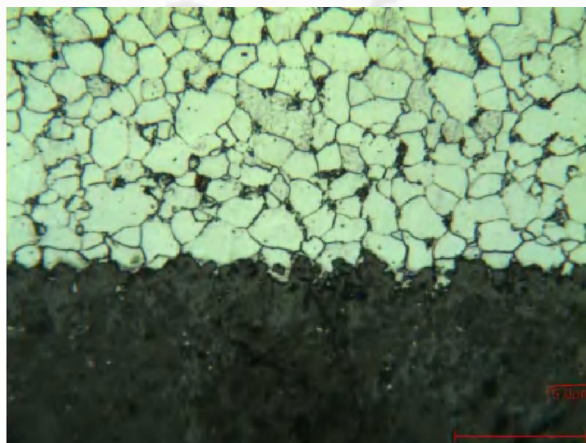
ترکیب	درصد وزنی	ترکیب	درصد وزنی	ترکیب	درصد وزنی	ترکیب	درصد وزنی
MgO	0.26	Al ₂ O ₃	0.22	SiO ₂	0.54	Iron Oxides	94.0
Cl	0.06	CaO	0.11	MnO	0.30	Laa & Lu	<1
CuO	3.6	ZnO	0.66	P ₂ O ₅	0.28		

بررسی ریز ساختاری

نمونه متالوگرافی از مقطع لوله به گونه ای تهیه گردیده است که امکان بررسی ریز ساختار نواحی مختلف از سطح خارجی تا سطح داخلی لوله ممکن باشد. همچنین از نواحی نزدیک به لبه پارگی (سوراخ شده) تصاویری تهیه شده است. این تصاویر به کمک میکروسکوپ نوری و در دو بزرگنمایی $100\times$ و $200\times$ گرفته شده است.

شکل ۶ تصاویر ریزساختار نمونه را در نزدیکی سطح داخلی لوله در دو بزرگنمایی مختلف نشان می دهد. همانطور که مشخص است ریزساختار عمدتاً از دانه های هم محور فریت تشکیل شده که در برخی نواحی، مقادیر محدودی پرلیت وجود دارد. آثار خوردگی بصورت لایه نسبتاً ضخیمی از محصولات آن در پایین تصاویر دیده می شود. دانه های چند ردیف اول از سطح داخلی لوله، تقریباً بطور کامل فریتی هستند و پرلیت به ندرت در این بین یافت می شود. علاوه بر این، در برخی نواحی مرز دانه ای کاربیدهایی مشاهده می گردد. این موارد نشان از بیش گرمایش طولانی مدت^۱ فولاد دارد که امکان مهاجرت کربن از داخل فریت، تجزیه پرلیت و تشکیل کاربیدهایی مرزدانه ای را فراهم نموده است. این پدیده در اثر کاهش جریان آب در داخل لوله‌ها به دلیل توده مواد رسوبی و عدم امکان تبادل حرارت لوله با آب درون آن اتفاق افتاده است. علاوه بر آن آثار خوردگی مرزدانه‌ای در سطح داخلی نیز دیده می‌شود.

شکل ۷ تصاویر متالوگرافی را از نواحی نزدیک سطح خارجی لوله نشان می دهد. در این نواحی نیز ساختار عمدتاً فریتی است و لایه اکسیدی مشاهده می شود. از مقایسه این تصاویر با شکل ۶ معلوم می گردد که آثار خوردگی و ضخامت لایه اکسیدی در سطح خارجی نسبت به سطح داخلی لوله کمتر است که می تواند به دلیل تماس مستقیم آب با دیواره درونی لوله باشد. از طرفی ریزساختار در دیواره خارجی تقریباً بطور کامل فریتی بوده، پرلیت به ندرت در آن یافت می شود و مقدار کاربیدهایی مرزدانه ای بیشتر از نواحی دیواره درونی می باشد که نشان از اثر گذاری بیشتر فرایندهای بیش گرمایش طولانی مدت و نیز کربن زدایی (دی کربوره شدن)^۲ سطحی در این ناحیه دارد. شکل ۸ تصاویر متالوگرافی لبه پارگی و ناحیه نزدیک به یک سوراخ را نشان می دهد که تجزیه پرلیت، کربن زدایی، حمله گسترده خوردگی و پیشروی ترک در مرزدانه های فریت بوضوح در آن قابل رویت می باشد.



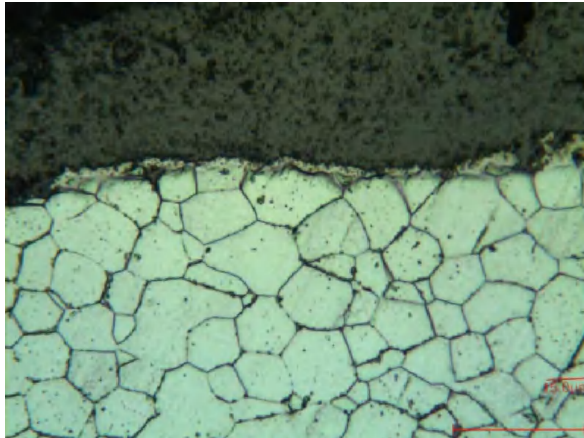
(ب)

(الف)

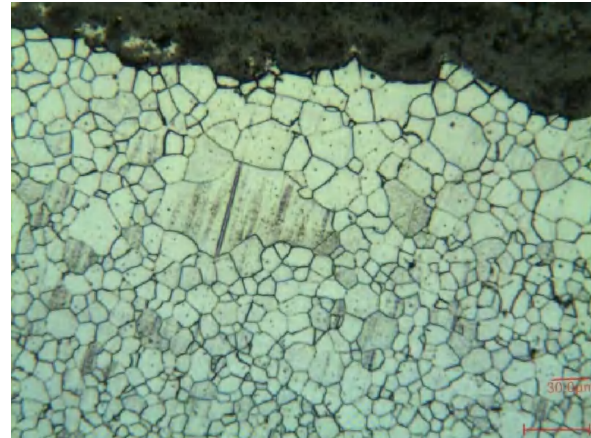
شکل ۶- ریزساختار نواحی نزدیک به سطح داخلی یک لوله تخریب شده.

¹ Long-term overheating

² Decarburization

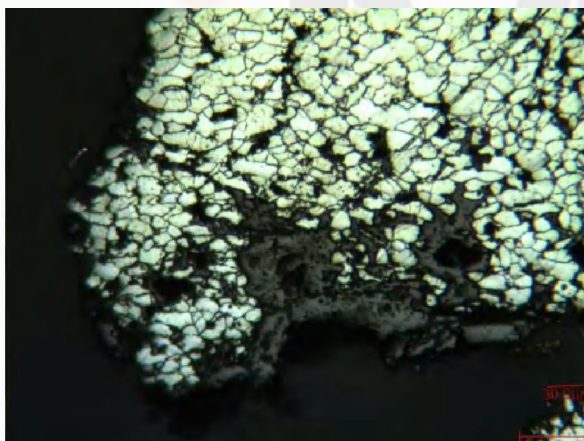


(ب)

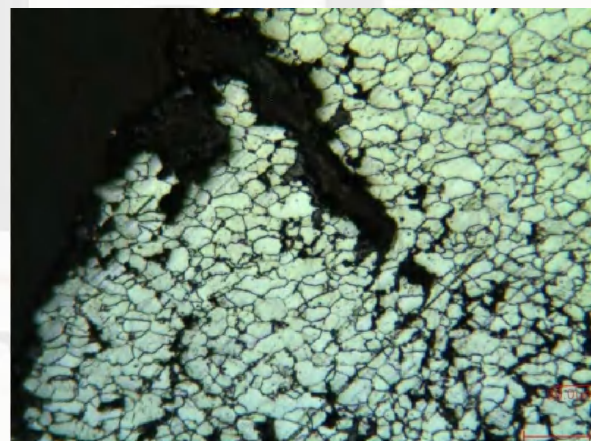


(الف)

شکل ۷- ریزساختار نواحی نزدیک به سطح خارجی یک لوله تخریب شده.



(ب)



(الف)

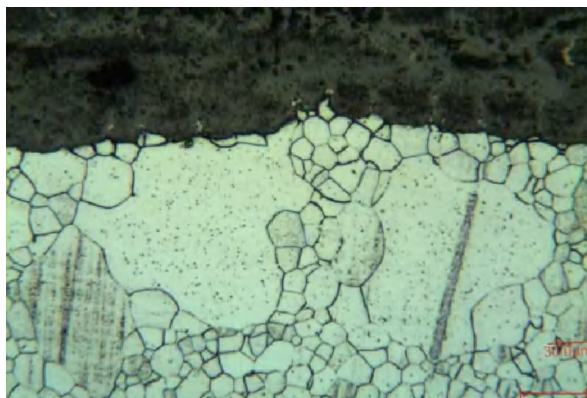
شکل ۸- ریزساختار لبه پارگی و ناحیه نزدیک به یک سوراخ.

بطور کلی ساختار فولاد کم کربن (حاوی کمتر از ۰/۱٪ کربن) شامل دانه های هم محور فریت می باشد. لایه اکسیدی که بر روی سطح فولاد تشکیل می گردد می تواند با سه ترکیب شیمیایی وستیت (FeO)، هماتیت (Fe₂O₃) و مگنتیت (Fe₃O₄) وجود داشته باشد. در زیر دمای ۵۷۰ درجه، فقط دو نوع اکسید هماتیت و مگنتیت شکل می گیرند و در بالای دمای مذکور هر سه لایه اکسیدی می توانند ایجاد گردند. سطوح فولاد قبل از حرارت دیدن، در دماهای پایین توسط یک لایه کریستالی مگنتیت پوشش داده می شود و سپس لایه های بعدی مگنتیت بر روی این لایه شکل می گیرد. در دماهای بالا، لایه وستیت تشکیل شده که در صورت کاهش دما، تحت شرایط تعادل طبق یک استحال یوتکتیکی به هماتیت و مگنتیت تبدیل می گردد. کربن فولاد در فصل مشترک فلز-لایه اکسیدی، تمایل به ایجاد تعادل با پوسته اکسیدی دارد، از اینرو به دلیل حلالیت پایین کربن در وستیت، کربن در سطح فلز به شکل گازهای CO و CO₂ اکسید شده و بواسطه نفوذپذیری پوسته

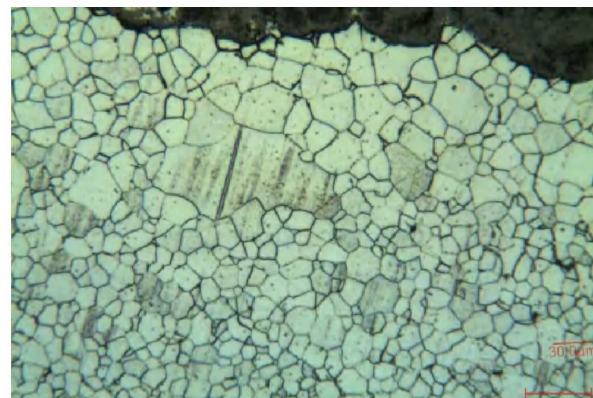
اکسیددی در برابر این گازها، در اتمسفر رها می‌شود. بنابراین یک شیب غلظتی برای کربن از سطح به مغز ایجاد می‌شود که به نام لایه دی‌کربوره شناخته می‌شود. هرچه زمان قرارگیری فولاد در دماهای بالا تحت شرایط تشکیل لایه اکسیددی بیشتر باشد، لایه دی‌کربوره بیشتری ایجاد می‌گردد. پدیده کربن زدایی تأثیر نامطلوبی بر خواص استحکامی فولاد گذاشته و سبب کاهش استحکام نهایی و تسلیم آن می‌گردد. این لایه در سطح خارجی بصورت وسیع تری مشاهده می‌شود و تقریباً منجر به ریزساختار کاملاً فریتی شده است.

بطور کلی ریزساختار در نزدیک سطح خارجی درشت دانه تر از سطح داخلی می‌باشد. شکل ۹ حضور برخی دانه‌های بسیار درشت فریت را در نواحی دیواره خارجی نشان می‌دهد که حکایت از رشد شدید دانه‌ها دارد. این نحوه رشد بی‌قاعده دانه‌ها می‌تواند در اثر افزایش بیش از حد دمای موضعی لوله، ایجاد شده باشد. تشکیل کاربید در مرزدانه‌ها و رشد بی‌قاعده برخی دانه‌ها دلایل روشنی هستند که احتمال وقوع بیش گرمایش طولانی مدت را (حتی بصورت موضعی) تقویت می‌کنند. ایجاد چنین تغییرات وسیع ریزساختاری در لوله‌ها و نیز همانطور که در مبحث بازرسی چشمی ذکر گردید، تشکیل حجم گسترده‌ای از رسوبات و محصولات خوردگی در مدت بهره‌برداری نه چندان طولانی لوله‌ها، حکایت از رخداد شرایطی غیر عادی در حین بهره‌برداری از آنها دارد. بر اساس اطلاعات رسیده از کارشناسان نیروگاه، لوله‌های بویلر مورد بررسی چند ماه قبل از حادثه، بطور کامل تعویض شده و برای تست هیدرواستاتیک آن از آب استفاده شده است که این آب بعد از انجام تست، از داخل لوله‌ها تخلیه نشده و به مدت حدود ۳ ماه در سیستم باقی مانده است.

در صورت خارج شدن بویلر از مدار، کیفیت آب بویلر باید تحت کنترل پیوسته باشد تا لوله‌ها دچار خوردگی نشوند. روش نگهداری، به مدت زمان خروج بویلر از مدار بستگی دارد. اگر زمان خاموشی بیش از ۶ هفته باشد، از روش نگهداری خشک و در غیر اینصورت از روش نگهداری تر استفاده می‌شود. در روش خشک بویلر باید کاملاً تخلیه، تمیز و خشک شود و گرم کردن بویلر به منظور حذف رطوبت آن ضروری می‌باشد [۳]. برای لوله‌های مورد بررسی، ظاهراً هیچگونه عملیات نگهداری طی زمان نسبتاً طولانی خروج بویلر از مدار، صورت نگرفته و آب داخل لوله‌ها می‌توانسته شرایط را برای بروز خوردگی شدید بر روی دیواره داخلی لوله‌ها و تشکیل رسوبات گسترده فراهم آورد. در راه اندازی مجدد و یا خاموش کردن های بویلر، به دلیل وجود اختلاف بین ضریب انبساط حرارتی رسوبات و فولاد لوله، احتمال شکستن، خرد و جدا شدن از دیواره‌ها برای این رسوبات ترد، زیاد بوده است. در صورت بروز چنین شرایطی، رسوبات در محل خم لوله‌های بویلر جمع می‌شوند و به مرور زمان منجر به تشکیل لایه‌های ضخیم و در مواردی کلوخه‌های بزرگ از رسوبات می‌گردد که شکل ۴-ب احتمال این رخداد را تقویت می‌نماید.



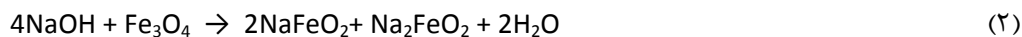
(ب)



(الف)

شکل ۹- رشد بی‌قاعده برخی دانه‌ها در نزدیکی سطح خارجی لوله‌ها.

علاوه بر آنچه ذکر شد، عوامل دیگری نیز می‌تواند در تشدید خوردگی و تسریع شکل‌گیری رسوبات دخیل باشد. از جمله این عوامل، شیمی نامناسب آب و افزایش PH آن حتی بصورت موضعی می‌باشد که می‌تواند منجر به خوردگی قلیایی^۱ گردد. این پدیده، واکنشی خورنده بین هیدروکسید سدیم تغلیظ شده و فلز می‌باشد که طی آن لایه مگنتیت سطح فولاد در هیدروکسید سدیم دارای PH بالا طی واکنش زیر حل می‌گردد [۴]:



پس از حل شدن مگنتیت، ممکن است هیدروکسید سدیم مستقیماً با آهن وارد واکنش شده و باعث خوردگی آن گردد [۴]:



از آنجایی که هیدروکسید سدیم (یا نمک‌های مولد قلیا^۲) به ندرت در مقادیر خورنده در آب بویلر وجود دارند، جهت ایجاد خوردگی قلیایی وجود مکانیزم‌های تغلیظ^۳ ضروری می‌باشد. در این بین یکی از دلایل عمده تغلیظ مواد خورنده و افزایش موضعی PH، مکانیزم رسوب^۴ می‌باشد. تشکیل رسوبات گسترده در سطح داخلی لوله منجر به ایجاد یک عایق حرارتی شده، سبب می‌گردد دمای سطح فلز در زیر رسوب، بصورت موضعی افزایش یافته و آب آن ناحیه تبخیر گردد. بخار آب حاصل، از زیر لایه رسوب خارج گردیده و مواد خورنده خود را در برجای می‌گذارد. ادامه این فرایند سبب افزایش غلظت مواد خورنده در زیر رسوبات و خوردگی شدید سطح فلز می‌گردد. شکل ۱۰ یک نمونه بارز از خوردگی قلیایی عمیق را در زیر رسوب‌های داخل یک لوله بویلر نشان می‌دهد [۴، ۵]. از طرفی، همانطور که ذکر شد، این رسوبات مانند یک عایق حرارتی عمل کرده و تا حد قابل توجهی مانع انتقال گرمای لوله به آب داخل آن می‌گردد، در نتیجه با ادامه عملکرد مشعل‌ها بر روی لوله، به تدریج دمای فولاد افزایش یافته و سبب بیش‌گرمایش آن می‌گردد که این پدیده در مورد دیواره خارجی حادث‌تر خواهد بود.



شکل ۱۰- خوردگی قلیایی عمیق در زیر رسوب‌های داخلی یک لوله بویلر [۵].

¹ Caustic corrosion

² Alkaline-producing salts

³ Concentration mechanisms

⁴ Deposition mechanism

با مفروض دانستن عوامل تاثیر گذار ذکر شده در مورد لوله های مورد بررسی، وجود رسوبات گسترده و تغییرات وسیع ریزساختاری بویژه در سطح خارجی لوله ها که منجر به دی کربوره شدن سطحی، مهاجرت کربن از فریت (تشکیل کاربیدهای مرز دانه ای) و رشد بی قاعده برخی دانه ها شده است، قابل توجه خواهد بود. خوردگی پیوسته دیواره لوله و کاهش ضخامت ماده تحمل کننده فشار داخلی (افزایش تنش) از یک سو و افت خواص استحکامی فولاد که با افزایش موضعی دمای لوله و نیز در اثر تغییرات نامطلوب ریزساختاری رخ می دهد از سوی دیگر، توانایی فراهم نمودن شرایط برای تخریب زود هنگام لوله ها و سوراخ شدن آنها را داشته است.

تخمین دمای موضعی لوله

با لحاظ کردن یکسری فرضیات ساده کننده می توان دمای موضعی لوله های مورد نظر را در محل های تخریب و سوراخ شده، بصورت تقریبی برآورد نمود. به این منظور از رابطه کلی تنش محیطی در مخازن جدار نازک استفاده شده است:

$$\sigma = \frac{Pr}{t} \quad (۴)$$

چنانچه در این رابطه فشار کاری لوله ها به عنوان $P = ۱۳/۸ \text{ bar}$ و شعاع لوله ها به عنوان $r = ۲۵/۵ \text{ mm}$ در نظر گرفته شود، با قرار دادن ضخامت تقریبی لوله در یکی از محل های سوراخ شده به عنوان $t = ۰/۳ \text{ mm}$ ، مقدار تنش تسلیم فولاد لوله (σ) در آن محل و شرایط دمایی حاصل می گردد. با انجام این محاسبات، مقدار تنش برابر با ۱۱۷ MPa بدست می آید. حال با مراجعه به استاندارد DIN 17175 [۶] که در آن تنش تسلیم فولاد St 45.8 (استاندارد مشابه فولاد لوله ها) در دماهای مختلف ارائه شده است (جدول ۳)، می توان دمایی را که فولاد مذکور دارای تنش تسلیمی نزدیک مقدار محاسبه شده می باشد، استخراج نمود. بر این اساس دمای موضعی این لوله در محل تخریب بیش از ۴۵۰°C تخمین زده می شود.

اگر چه در این محاسبات چندین شرط ساده کننده در نظر گرفته شده و نتیجه آن صرفاً یک تقریب برای شرایط موضعی لوله بوده است اما کلیت آن، تایید کننده این مطلب می باشد که تشکیل رسوبات ضخیم و عدم امکان انتقال حرارت مناسب داخل لوله که همزمان با عملکرد عادی مشعل ها همراه بوده، منجر به افزایش بیش از حد دمای لوله گردیده (بیش گرمایش) و شرایطی را که در بررسی ها مشخص شده، برای تخریب زود هنگام لوله های بویلر فراهم آورده است.

جدول ۳- مقدار حداقل تنش تسلیم فولاد St 45.8 در دماهای بالا [۶]

Steel grade		Wall thickness s mm	0.2%-yield limit at							
Code number	Material number		200℃	250℃	300℃	350℃	400℃	450℃	500℃	550℃
			N/mm² minimum							
St 45.8	1.0405	≤ 16	205	185	160	140	130	125	-	-
		16<s≤40	195	175	155	135	130	125	-	-
		40<s≤60 1)	190	170	150	135	130	125	-	-

پیشنهاد اجرایی

- بر اساس آنچه ذکر شد، برای به حداقل رساندن احتمال وقوع تخریب‌های مشابه، موارد زیر پیشنهاد می‌گردد:
- ۱- در اسرع وقت درام بالا و پایین بویلر باز شود و با هر روش ممکن حتی فنر زدن، داخل لوله‌ها و هدر پایین تمیز گردد.
 - ۲- در اولین خروج از مدار واحد، ضخامت لوله‌ها به ویژه در محل خم‌های پایینی اندازه‌گیری شده و در صورت مشاهده شرایط غیر عادی اقدامات مقتضی (تعویض خمها) انجام پذیرد.
 - ۳- در زمان‌هایی که بویلر خارج از مدار می‌باشد، با توجه به زمان توقف ضروری است که یک روش نگهداری مناسب (خشک یا تر) انتخاب و به درستی انجام گیرد.
 - ۴- منابع ورود یون مس به آب بویلر شناسایی و کنترل گردد.

لازم به ذکر است که در نهایت پس از بازکردن بویلر و به دلیل خرابی تعداد زیادی از لوله‌ها، اقدام به بریدن لوله‌های آسیب دیده و تعویض کامل آن‌ها شده است. شکل ۱۱ بویلر را پس از بریدن لوله‌های معیوب نشان می‌دهد.



شکل ۱۱- برش لوله‌های آسیب دیده به منظور تعویض آن‌ها.

نتیجه گیری

با توجه به بررسی‌های انجام شده، مراحل و عوامل محتمل در تخریب لوله‌های بویلر مورد نظر، بطور خلاصه به شرح ذیل می‌باشد:

- ۱- باقی ماندن طولانی مدت آب داخل بویلر بعد از تست هیدرواستاتیک و در شرایط خارج بودن بویلر از مدار، بدون اینکه شرایط نگهداری خاصی (اعم از نگهداری تر یا خشک) تامین شده باشد، سبب خوردگی شدید دیواره داخلی و تشکیل حجم قابل توجهی از رسوبات شده است.

- ۲- در راه اندازی مجدد و یا خاموش کردن های بویلر به دلیل اختلاف ضریب انبساط حرارتی لوله و محصولات خوردگی، رسوبات خرد و از دیواره ها جدا شده، در محل هایی مانند خم‌های لوله پایین بویلر تجمع نموده است.
- ۳- در زیر لایه های ضخیم رسوبی، شرایط تغلیظ بوجود آمده و منجر به خوردگی قلیایی شده که به افزایش حجم رسوبات و کاهش ضخامت موضعی لوله انجامیده است.
- ۴- لایه ها و توده های بزرگ رسوبی، مانع مهمی برای انتقال حرارت دمای لوله به آب بوده و بصورت موضعی شرایط بیش گرمایش را برای لوله ها فراهم آورده و منجر به تخریب ریزساختار و کاهش خواص استحکامی فولاد شده است.
- ۵- تاثیر تجمعی این عوامل نامطلوب، شرایط را برای تخریب زود هنگام لوله ها (خوردگی قلیایی در زیر رسوبات، کاهش ضخامت موضعی و بیش گرمایش بلندمدت) فراهم آورده است.

مراجع

1. ASTM, *ASTM A210: Standard Specification for Seamless Medium-Carbon Steel Boiler and Superheater Tubes*, USA, 2002.
2. D. French, *Metallurgical Failures in Fossil Fired Boilers*, Wiley Pub., 1983.
۳. خ. رحمانی، *متالورژی شیمی و خوردگی در بویلر*، انتشارات دانشگاه صنعت آب و برق، تهران، ۱۳۸۸.
۴. س.ا. موسوی ترشیزی، *بویلر و خرابی های آن*، انتشارات مشانیر، تهران، ۱۳۸۳.
5. R.D. Port and H.M. Herro, *The Nalco Guide to Boiler Failure Analysis*, McGraw-Hill Inc., New York, 1991.
6. DIN, *DIN 17175: Seamless Steel Tubes for Elevated Temperatures*, Germany, 1979.