

Evaluation of Severity and Type of Damages in Steam Reformer Tubes using Nondestructive Eddy Current Method

Ruaa Alshareefi¹  | Majid Abbasi²  | Maryam Shamgholi³ 

1. Faculty of Materials and Industrial Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran. E-mail: ruaadnan00@gmail.com
2. Faculty of Materials and Industrial Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran. E-mail: abbasim@nit.ac.ir
3. R&D Manager of EDDYWISE NDT, Izmir, Türkiye. E-mail: shamgholi@eddywise.com

ABSTRACT

Article Information:

Research Article

Received 27 March 2025

Revised 20 April 2025

Accepted 30 May 2025

Keywords:

Eddy Current Testing,
Steam Reformer Tube,
HP40Nb,
Life Assessment,
Damage.

In this paper, a novel method for non-destructive evaluation of the type and severity of damage in HP40Nb steam reformer tubes is presented based on the eddy current method. Beyond simple defect detection, this method provides numerical representation of various types of microstructural damage. Field and laboratory inspections were performed on tubes from three reformer units of an Iranian petrochemical industrial unit with nominal operating lives of 5, 13, and 16 years. Eddy current inspection was performed by the point scanning method with an electromagnetic sensor with a T-shaped core at a frequency of 60 kHz using a handheld portable device. Microstructural studies of samples of these tubes were performed with optical and scanning electron microscopes equipped with EDS analysis. The results of the microstructural laboratory studies showed that the main damages in the damaged pipes include changes in the amount and type of carbides, reduction in the chromium content of the matrix, carburization, oxidation, and microcracking. Eddy current evaluations showed that the microstructural and the eddy current variations can be characterized by appropriate parameters. Intrinsic damage (D_i) due to carburization and oxidation can be evaluated using the phase angle index and creep damage (D_{ii}), which is manifested by the formation of holes and cracks and can be evaluated using the impedance index. It has been observed that by increasing the amount of carburization and the conversion of $M_{23}C_6$ carbides to M_7C_3 and reducing the chromium content of the matrix, the phase angle index increases from 18.7 to a maximum of 63.2 degrees. Also, as the pipes' life increases and the creep cracks' nucleation and growth occur, the impedance index increases from a dimensionless value of 655 to 1064. Finally, by combining the two electromagnetic indices and presenting an empirical relationship, the total failure rate index (D_{total}) of each pipe is presented.

Cite this article: Alshareefi, R., Abbasi, M., Shamgholi, M. (2024). Evaluation of Severity and Type of Damages in Steam Reformer Tubes using Nondestructive Eddy Current Method. *Journal of Nondestructive Testing Technology*, 4 (1), 1-13.



© The Author(s).

DOI: <http://doi.org/10.30494/jndt.2025.514139.1161>

Publisher: Iranian Society for Nondestructive Testing

ارزیابی نوع و شدت خرابی لوله‌های ریفورمر بخار با استفاده از جریان گردابی

روی الشریفی^۱ | مجید عباسی^۲ | مریم شامقلی^۳

۱. دانشکده مهندسی مواد و صنایع، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران، رایانامه: ruaaadnan00@gmail.com

۲. دانشکده مهندسی مواد و صنایع، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران، رایانامه: abbasim@nit.ac.ir

۳. واحد تحقیق و توسعه ادی وایز ان‌دی‌تی، ازمیر، ترکیه، رایانامه: shamgholi@eddywise.com

چکیده:

در این مقاله، روشی نوین جهت ارزیابی غیرمخرب نوع و شدت خرابی در لوله‌های ریفورمر بخار از جنس HP40Nb بر پایه روش جریان گردابی ارائه شده است. این روش فراتر از تشخیص ساده نقص‌ها، انواع مختلف آسیب‌های ریزساختاری را به صورت عددی ارائه می‌کند. بازرسی به صورت میدانی و آزمایشگاهی روی لوله‌هایی از سه واحد ریفورمر یک واحد صنعتی پتروشیمی ایران با عمرهای بهره‌برداری اسمی ۵، ۱۳ و ۱۶ سال انجام شد. بازرسی جریان گردابی به روش روبش نقطه‌ای و با حسگر الکترومغناطیسی با هسته‌ای به شکل T در فرکانس ۶۰ کیلوهرتز توسط یک دستگاه قابل حمل دستی انجام شد. بررسی‌های ریز ساختاری نمونه‌هایی از این لوله‌ها با میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی روبشی مجهز به پردازش عنصری انجام شد. نتایج مطالعات آزمایشگاهی ریزساختاری نشان داد که آسیب‌های اصلی در لوله‌های آسیب دیده شامل تغییرات در مقدار و نوع کاربیدها، کاهش مقدار کروم زمینه، کربوره شدن، اکسیداسیون و ریزترک‌ها است. ارزیابی‌های جریان گردابی نشان داد که تغییرات ریزساختاری و تغییرات داده‌های آزمون جریان گردابی را می‌توان با شاخص‌های مناسبی مشخص کرد. آسیب ذاتی (D_i) ناشی از کربوریزاسیون و اکسیداسیون را با استفاده از شاخص تغییرات زاویه فاز جریان گردابی و آسیب ناشی از خزش (D_{II}) که با ایجاد حفره‌ها و ترک‌ها نمایان می‌شود را با استفاده از شاخص تغییرات امپدانس می‌توان ارزیابی کرد. مشاهده شده است که با افزایش میزان کربوره شدن و تبدیل کاربیدهای $M_{23}C_6$ به M_7C_3 و کاهش مقدار کروم فاز زمینه، شاخص زاویه فازی از عدد ۱۸,۷ به حداکثر ۶۳,۲ درجه افزایش می‌یابد. همچنین همزمان با افزایش عمر لوله‌ها و جوانه‌زنی و رشد ترک‌های خزشی، شاخص امپدانس از مقدار بدون بعد ۶۵۵ به مقدار ۱۰۶۴ افزایش می‌یابد. در پایان، با ترکیب دو شاخص الکترومغناطیس با یکدیگر و ارائه یک رابطه تجربی، شاخص میزان خرابی کل (D_{total}) هر لوله ارائه شده است.

اطلاعات مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۴/۱۱/۰۷

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۴/۱۱/۳۱

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۳/۰۹

کلیدواژگان:

جریان گردابی،
لوله ریفورمر بخار،
HP40Nb،
ارزیابی عمر،
خرابی.

استناد: الشریفی، روی، عباسی، مجید، شامقلی، مریم (۱۴۰۳). ارزیابی نوع و شدت خرابی لوله‌های ریفورمر بخار با استفاده از جریان گردابی. مجله فناوری آزمون‌های غیرمخرب، ۴(۱)، ۱-۱۳.

© نویسندگان

ناشر: انجمن آزمون‌های غیرمخرب ایران



DOI: http://doi.org/10.30494/jndt.2025.514139.1161

۱- مقدمه

نفوذپذیری مغناطیسی، جریان‌های گردابی را تغییر می‌دهد و در نتیجه امپدانس حسگر (پراب) را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۱۵،۱۴].

از دیدگاه متالورژیکی، فازهای مختلف در لوله‌های ریفورمر خواص الکترومغناطیسی متفاوتی را نشان می‌دهند. به طور خاص، هرگونه تغییر در مورفولوژی، ترکیب شیمیایی و مقدار فاز می‌تواند بر این خواص و پاسخ‌های جریان گردابی تأثیر بگذارد. بنابراین، تغییرات در امپدانس جریان گردابی (EC) لوله ریفورمر می‌تواند با تغییرات در ریزساختار ماده (آسیب‌های ریز ساختاری) که در طول عملیات در دمای بالا رخ می‌دهد، مرتبط باشد.

روش‌های موجود اغلب فاقد حساسیت برای تمایز بین آسیب ذاتی ناشی از فرآیندهایی مانند کربوریزاسیون و اکسیداسیون و آسیب ثانویه مرتبط با خزش ناشی از حفره‌های ریز و ترک خوردگی هستند. از این رو، هدف اصلی این مقاله، ارائه یک روش جریان گردابی جدید برای ارزیابی میزان آسیب لوله‌های فولاد زنگ‌نزن آستنیتی HP40Nb مورد استفاده در ریفورمر است. این مطالعه با ارائه یک تکنیک ECT نه تنها آسیب را تشخیص می‌دهد، بلکه شدت انواع مختلف آسیب را به صورت عددی ارائه می‌کند.

۲- مواد و روش

۱-۲ ریفورمر و لوله‌های ریفورمر

آزمایشات اصلی جریان گردابی در طول خاموش شدن سه کوره ریفورمر بخار در یک کارخانه پتروشیمی ایران انجام شد که به مدت ۵، ۱۲ و ۱۶ سال کار کرده‌اند. جدول ۱ اطلاعات کاری در مورد این کوره‌ها را ارائه می‌دهد. علاوه بر این، جدول ۲ برخی از داده‌های عملیاتی و طراحی را نشان می‌دهد که برای همه یکسان است. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، هر کوره شامل شش ردیف از ۵۶ لوله حاوی کاتالیزور و یک لوله رایزر (تغذیه گاز) در وسط بود که به صورت عمودی قرار داشت. یک ارزیابی جامع از ۱۰۰۰ لوله در نقطه انتخاب شده، مطابق شکل ۱-ب، انجام شد. عمر باقیمانده لوله‌ها به طور همزمان با روش اندازه‌گیری کرنش ارائه شده در جدول ۱ بررسی شد. هدف مقایسه تغییرات در سیگنال‌های جریان گردابی لوله‌ها بود.

لوله‌های ریفورمر به طور گسترده در کارخانه‌های شیمیایی، پالایشگاه‌ها و کارخانه‌های فولاد برای تبدیل گاز طبیعی یا سایر هیدروکربن‌ها به هیدروژن، مونوکسید کربن، آمونیاک یا سایر محصولات در شرایط دمای بالا و تنش مکانیکی استفاده می‌شوند. از ریفورمر بخار متان برای تولید آمونیاک استفاده می‌شود. در این فرآیند، گاز طبیعی گوگردزدایی شده برای تولید هیدروژن در حضور کاتالیزور نیکل (Ni) در دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد استفاده می‌شود [۲،۱].

لوله‌های ریفورمر از آلیاژهای مقاوم در برابر حرارت از طریق فرآیند ریخته‌گری گریز از مرکز تولید می‌شوند. HP40Nb یک فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ریختگی است که به طور گسترده برای لوله‌های ریفورمر بخار استفاده می‌شود. این فولاد شامل حدود ۳۵ درصد وزنی نیکل، ۲۵ درصد کروم و مقادیر کمی نیوبیم، کربن، سیلیسیم، منگنز و سایر عناصر است [۴،۳].

در طول سرویس، لوله‌های ریفورمر دچار تغییرات مختلفی در ریز ساختار خود می‌شوند، مانند کربوریزاسیون، اکسیداسیون، رسوب‌کاری، تغییرات فازهای مختلف، تغییر ترکیب شیمیایی فازها و ترک خوردگی خزشی که بر عملکرد آنها تأثیر می‌گذارد [۵-۲]. برای ارزیابی عمر باقیمانده و قابلیت اطمینان لوله‌های ریفورمر، این تغییرات باید با روش‌های مختلفی مانند متالوگرافی، پروفیلومتری لیزری و آزمایش جریان گردابی (ECT) شناسایی و نظارت شوند [۶-۸].

ECT عیوب، ترک‌ها، خوردگی‌ها و سایر نقص‌ها را در فلزات تشخیص می‌دهد [۸،۹]. علاوه بر این، برای بررسی و کنترل کیفیت ریزساختار یا خواص مکانیکی قطعات فلزی مختلف استفاده می‌شود [۱۰،۱۱]. اخیراً، برای بررسی آسیب‌های ریزساختاری لوله‌های ریفورمر توسعه یافته است که نقش مهمی در تعمیر و نگهداری و ارزیابی ایمنی صنایع دارد [۱۳،۱۲].

ECT تکنیکی است که از اصل القای الکترومغناطیسی برای القای جریان گردابی در یک ماده رسانا استفاده می‌کند. هرگونه تغییر در خواص الکترومغناطیسی، یعنی رسانایی و

جدول ۱) معرفی اطلاعات کاری کوره‌های ریفرمر مورد مطالعه و لوله‌های آنها.

F3	F2	F1	کوره ریفرمر
مارس ۲۰۱۷	اکتبر ۲۰۰۹	سپتامبر ۲۰۰۶	شروع بهره‌برداری
بدون اتفاق ناخواسته	بدون اتفاق ناخواسته	بدون اتفاق ناخواسته	وضعیت بهره‌برداری
بدون تعویض	بدون تعویض	بعد از ۱۲ سال بهره‌برداری، تعداد ۲۹ لوله تعویض شدند	وضعیت تعویض لوله‌ها
۴/۷۵ (۵≅)	۱۳	۱۶	مدت کارکرد اسمی (سال)
۳۸۰۰۰	۱۱۰۰۰۰	۱۳۶۰۰۰	مدت کارکرد اسمی (ساعت)
۳۲۸ لوله: < ۱۵ ۸ لوله: ۱۱-۱۵ و ۱ لوله: دارای نقطه داغ	۳۰۵ لوله: ۱۱-۱۵ ۳۱ لوله: ۸-۱۱	۳۰۶ لوله: ۱۱-۱۵ ۲۹ لوله: ۸-۱۱ و ۱ لوله: خارج از بهره‌برداری	عمر باقیمانده اسمی (سال) بر اساس کرنش سنجی با لیزر*
G4852 Micro R	KHR35CT	G4852 Micro R	جنس آلیاژ
HP40Nb	HP40Nb	HP40Nb	

* این داده‌ها از گزارش مکتوب بر اساس کرنش‌سنجی لیزری است که هم زمان انجام شده است.

جدول ۲) داده‌های عملیاتی و طراحی کوره‌های ریفرمر مورد مطالعه

مقدار	شاخص	
۸۱۲	دمای طراحی (°C)	
۷۹۰	دمای عملیات (°C)	
۹۲۴	دمای طراحی لوله فلزی (°C)	
۳/۲	نسبت بخار به کربن	
۴/۰۵	فشار طراحی (MPa)	
۳/۹	فشار بهره‌برداری (MPa)	
HP40Nb	جنس آلیاژ	
۱۱۸۸۰	طول موثر (mm)	اندازه لوله کاتالیستی ریفرمر (لوله نو)
(F1 and F3) ۱۳۴/۲ (F2) ۱۳۵/۸	قطر خارجی* (mm)	
۱۲/۱	ضخامت جداره (mm)	
۵۶	در هر ردیف	
۳۳۶	مجموع	
۶	تعداد لوله تغذیه	

* با توجه به طرح حسگر انتخاب شده، تغییرات جزئی قطر بر پاسخ‌های جریان گردابی ناچیز و قابل صرف‌نظر کردن است.

جدول ۳) ترکیب شیمیایی لوله‌های ریفورمر بخار مورد استفاده در این مطالعه (درصد وزنی)

Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Co
36.06	0.536	0.67	0.41	0.01	<0.001	25.23	<0.001	35.28	0.024
Cu	Al	Nb	Ti	V	W	B	N	Pb	Sn
0.03	0.01	1.01	0.07	0.03	0.44	<0.001	0.17	<0.002	<0.001



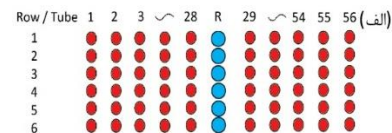
شکل ۲) الف) تصویری از برخی لوله‌های ریفورمر آسیب دیده و ب) نمونه برداری از یک لوله گسیخته شده برای تجزیه و تحلیل ریزساختاری.... ۲،۳. امکانات و روش ECT

تجهیزات ارزیابی جریان گردابی در شکل ۳ نشان داده شده است. این شامل یک دستگاه قابل حمل جریان گردابی قابل حمل مدل IH-ECP104، مجهز به تولید کننده جریان متناوب با فرکانس مشخص و سیستم‌های اندازه‌گیری ولتاژ و جریان لحظه‌ای (شکل ۳. الف) و یک حسگر با هسته‌ای T شکل (شکل ۳. ب و جدول ۴) است که روی نمایشگر دستگاه، (شکل ۳ ج) صفحه امپدانس نشان می‌دهد. مقاومت اهمی R_x و مقاومت خود القایی، X_L ، سی‌م‌پیج جریان گردابی به صورت لحظه‌ای اندازه‌گیری و روی صفحه نمایش به صورت اعداد بدون بعد نرمال شده نشان داده می‌شود. همچنین موقعیت مکانی هر نمونه روی صفحه نمایش ثبت می‌شود. این صفحه در واقع همان صفحه امپدانس بر حسب دو متغیر مقاومت اهمی (محور افقی) و مقاومت خود القایی (محور عمودی) حسگر است.

هنگامی که حسگر به صورت عمودی روی نمونه قرار می‌گیرد، دستگاه به طور خودکار تغییر در مقدار امپدانس حسگر را در مقایسه با نقطه مبنا (نقطه سبز در شکل ۳ ج) نشان می‌دهد. نقطه مبنا موقعیت الکترومغناطیسی حسگر روی صفحه امپدانس است وقتی که حسگر از لوله دور است (یا در هوا قرار دارد). در حین بازرسی، نتایج الکترومغناطیسی هر لوله ذخیره و روی طرح‌های صفحه امپدانس نمایش داده می‌شوند. مقدار امپدانس نرمال شده (Z) و زاویه فاز (θ^e) بر

۲-۲ نمونه برداری برای بررسی‌های متالورژیکی

مطابق شکل ۲، نمونه‌های مختلفی از لوله‌های آسیب دیده و تعویض شده برای تجزیه و تحلیل متالوگرافی تهیه شدند. نمونه‌های متالوگرافی با استفاده از کاغذ SiC با شماره‌های ۱۲۰ تا ۳۰۰۰ سنباده‌زنی شده و سپس با استفاده از آلومینا ۱ میکرومتری و خمیر الماس ۰،۵ میکرومتری صیقل داده شدند. در نهایت، نمونه‌ها با استفاده از محلولی متشکل از گلیسیرین، HCL و HNO_3 به نسبت ۳:۳:۱ حکاکی شدند. بازرسی‌های ریزساختاری با استفاده از یک میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به تحلیل‌گر طیف‌سنجی پراش انرژی و میکروسکوپ نوری مجهز به پردازش تصویر انجام شد. مطابق جدول ۳، ترکیب شیمیایی لوله‌ها توسط دستگاه طیف‌سنجی نشر جرقه‌ای تعیین شد که از نوع آلیاژ ریختگی HP40 آلیاژ شده با نیوبیم است.



شکل ۴) الف) طرح شماتیک از چینش لوله‌ها، ب) موقعیت بحرانی منتخب برای ارزیابی نقطه‌ای.

شده انجام شد تا از نتایج دقیق اطمینان حاصل شود. بررسی‌ها در جهت‌های طولی و شعاعی روی لوله‌های منتخب انجام شد تا تغییرات در هر لوله تعیین شود. بازرسی‌های جریان گردابی نیز در موقعیت‌های مختلف روی لوله‌های در حال استفاده و در فرکانس‌های مختلف (۴۰-۲۰۰ کیلوهرتز) انجام شد تا موقعیت و فرکانس مناسب شناسایی شود. به طور معمول، نقطه انتخاب شده (همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است) بی‌شترین آسیب را نشان می‌دهد. بنابراین، آسیب‌های لوله‌های در حال استفاده در موقعیت انتخاب شده در ۶۰ کیلوهرتز و بزرگنمایی ۳۵ دسی‌بل مقایسه شد (همان‌طور که در شکل ۳ ج نشان داده شده است). مستطیل زرد و نقطه سبز در شکل ۳ ج به ترتیب موقعیت سیگنال لوله جدید (استفاده نشده) و سیگنال نقطه مبنا یا نقطه هوا را نشان می‌دهند. این دو نقطه می‌توانند به اطمینان از پایداری شدن وضعیت واحد ECT در طول آزمایش‌ها کمک کنند.

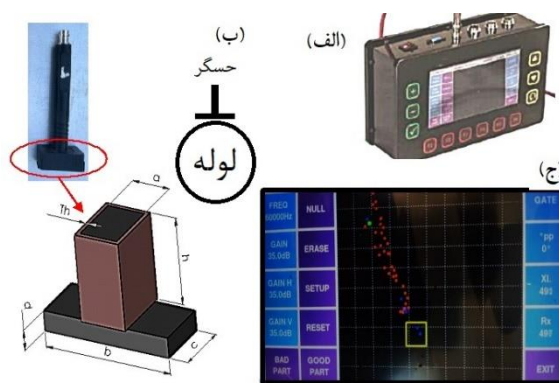
بازرسی‌های اولیه نشان داد که سنگ‌زنی سطح بیرونی لوله تعویض شده کمتر از ۰٫۵ در صد بر سیگنال‌های جریان گردابی تأثیر دارد. بنابراین، آزمایش‌ها روی هر لوله در نقطه انتخاب شده با سه تکرار در فاصله ± 20 میلی‌متر بدون تمیز کردن یا سنگ‌زنی سطوح بیرونی انجام شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱ تجزیه و تحلیل آسیب‌های میکروسکوپی

برای بهره‌گیری درست از پاسخ‌های آزمون جریان گردابی برای تخمین عمر لوله‌های ریفورمر نیاز است که تغییرات ریزساختاری و آسیب‌های درونی که در آن حین کار به وجود می‌آید، شناسایی و تحلیل شود. مهمترین تغییرات شامل اکسیداسیون، کربوره شدن، تغییرات مورفولوژی و مقدار کاربیدها و سایر رسوبات و در نهایت ایجاد ترک‌های خزشی و پاره شدن است.

شکل ۴، تصویر ریزساختاری نوری نمونه ریخته‌گری شده HP40Nb را نمایش می‌دهد که معرف ریز ساختار یک نمونه نو و کار نشده است. ریزساختار ریختگی (شکل ۴ الف) شامل یک زمینه آستنیتی با سلول‌های یونکتیک مختلف در موقعیت‌های بین‌دندریتی یا مرز دانه است.



شکل ۳ (الف) دستگاه جریان گردابی مدل IH-ECP104، (ب) موقعیت قرارگیری و طرح حسگر با هسته‌ای T شکل، (ج) صفحه نمایش دستگاه در حین آزمایش (صفحه امیدانسی)

جدول ۴ (۴) داده‌های طراحی حسگر مورد استفاده با هسته T شکل

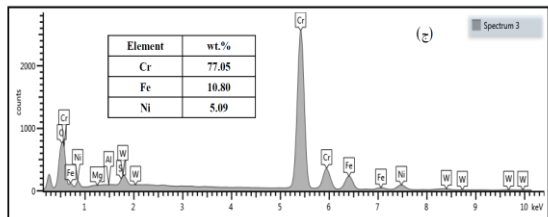
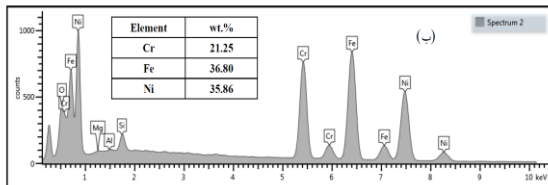
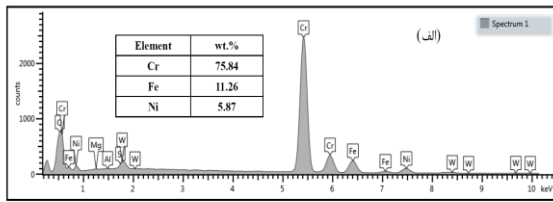
مقدار	مشخصات حسگر
$9.7 \times 33 \times 12.7 \times 4.5 \times 19.3$	Ferrite dimensions, (mm) ($a \times b \times c \times d \times h$)
1	ضخامت سیم پیچ (mm)
0.3	قطر سیم (mm)
1200	تعداد حلقه سیم پیچ (N)

اساس مقادیر به دست آمده مطابق معادلات ۱ و ۲ محاسبه می‌شوند. با استفاده از این معادلات، می‌توان به صورت عددی میزان آسیب در هر لوله را تخمین زد و شواهد ریز ساختاری و پیش‌بینی‌های عمر باقیمانده را با اندازه‌گیری کرنش لوله‌ها مقایسه کرد. به علاوه، این تخمین را می‌توان به صورت گرافیکی با مقایسه موقعیت سیگنال‌ها روی صفحه امیدانسی در طول بازرسی انجام داد و به صورت درجا مشاهده نمود (همان‌طور که در شکل ۳ ج نشان داده شده است).

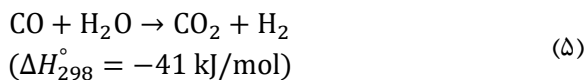
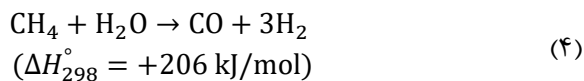
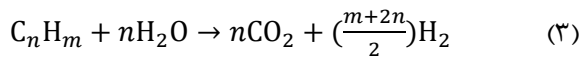
$$Z = \sqrt{R_X^2 + X_L^2} \quad (1)$$

$$\theta \text{ (degree)} = \left(\frac{180}{\pi}\right) \tan^{-1} \left(\frac{X_L}{R_X}\right) \quad (2)$$

این تجهیزات با استفاده از لوله‌های مرجع با عمر از پیش تعیین شده (لوله‌های جدید، در حال استفاده برای ۴، ۵، ۱۲ و ۱۶ سال) و لوله‌های تعویض شده کالیبره شدند. بازرسی‌های اولیه روی لوله‌های تازه ساخته شده و تعویض



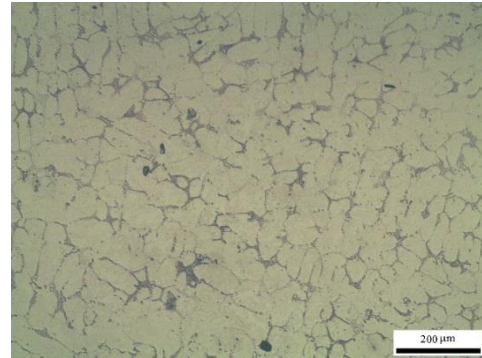
شکل ۶ تجزیه و تحلیل EDS نقاط انتخاب شده روی شکل ۵. ج: الف) طیف ۱، ب) طیف ۲، ج) طیف ۳.



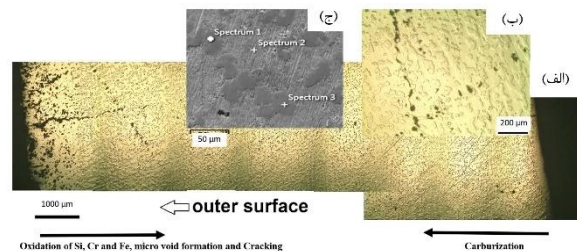
واکنش بودوارد (واکنش ۶) دی اکسید کربن و کربن تولید می‌کند و در تمام دماها گرمازا است. بنابراین با افزایش دما واکنش به سمت تشکیل CO تمایل می‌کند. پس، کربوریزاسیون یا تشکیل دوده می‌تواند زمانی رخ دهد که دما کاهش یابد یا فشار جزئی CO یا فشار کل در لوله افزایش یابد. مقدار ثابت تعادل، اثر دما بر واکنش بودوارد را تعیین می‌کند. مقدار $\log_{10}(K_{eq.6})$ برای واکنش به عنوان تابعی از دما تقریباً برابر است با [۲۲، ۲۱]:

$$\log_{10}(K_{eq.6}) = \frac{9141}{T} + 0.000224T - 9.595 \quad (۷)$$

در $702^{\circ}C$ مقدار $\log_{10}(K_{eq.6})$ صفر است. هنگامی که دمای گاز داخلی به کمتر از $702^{\circ}C$ درجه سانتیگراد کاهش



شکل ۴ تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار ریختگی فولاد HP40Nb.



شکل ۵ الف و ب) تصاویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار و ج) لوله ریفورمر بخار HP40Nb پس از پارگی.

سلول های یوتکتیک حاوی کاربیدهای M_7C_3 ، $M_{23}C_6$ و M_7C_3 هستند. کاربیدهای M_7C_3 و $M_{23}C_6$ دارای مورفولوژی لایه‌ای بزرگتر از کاربیدهای MC جدا شده هستند. علاوه بر این، شکل ۵، تصاویر ریز ساختاری نمونه لوله ریفورمر را که در طول سرویس پاره شده است (نمونه پیر شده) نمایش می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، پدیده پیری در اتمسفر ریفورمر می‌تواند مورفولوژی و ترکیب زمینه و کاربیدها را تغییر دهد. علاوه بر این، تشکیل حفره و ترک خوردگی در اطراف کاربیدهای بلوکی قابل مشاهده است. شکل ۶، تجزیه و تحلیل EDS فازهای مختلف که در شکل ۵ نشان داده شده را نشان می‌دهد که مربوط به نمونه پیر شده است. تجزیه و تحلیل EDS نشان می‌دهد که مقادیر Cr، Ni و Fe در زمینه و کاربیدها تغییرات قابل توجهی دارند.

در سطوح بیرونی لوله که در تماس با شعله هستند، اکسیداسیون عناصر Si، Cr و Fe می‌تواند زودتر رخ دهد. علاوه بر این، کربوریزاسیون سطح داخلی می‌تواند بر اساس واکنش‌های اصلی (واکنش بودوارد، معادله ۶) روی لوله به شرح زیر رخ دهد [۱۹، ۲۰]:

سمت ترکیب Fe-Ni می‌رود و زمینه به طور پیوسته فرومغناطیسی تر می‌شود. در نتیجه، این فرصتی برای تشخیص جریان گردابی کربوریزاسیون یا سایر آسیب‌های پیری لوله‌های ریفرمر است [۸، ۱۶، ۲۳].

۲-۳ تجزیه و تحلیل صفحه امیدانسی

شکل ۷ داده‌های به‌دست‌آمده از بازرسی‌های جریان گردابی سه کوره ریفرمر بخار به نام‌های F1، F2 و F3 را نشان می‌دهد که به ترتیب تقریباً ۱۶، ۱۳ و ۵ سال در حال بهره‌برداری بودند (به جداول ۲ و ۳ مراجعه کنید). این داده‌ها به صورت جداگانه به صورت صفحه امیدانسی برای سه ریفرمر ارائه شده‌اند. نقطه مبنا روی تصاویر، موقعیت حسگر در هوا را مشخص می‌کند. در این نقطه مبنا، مناطق مغناطیسی و غیرمغناطیسی را از هم جدا می‌کند. یک لوله استفاده نشده (که با یک X قرمز در جعبه زرد نشان داده شده است) دارای کمترین X_L و بیشترین R_X است، زیرا دارای یک زمینه آستنیتی است که غیرمغناطیسی است. مهم‌ترین نکاتی که از این صفحات امیدانسی می‌توان مشاهده کرد به شرح زیر است:

- در هر کوره، لوله‌های مختلف با زمان کارکرد اسمی یکسان، پاسخ‌های جریان گردابی متفاوتی دارند که می‌تواند مربوط به شرایط کارکرد، موقعیت لوله‌ها در ریفرمر، توزیع حرارت و دما در لوله و کوره، جریان گاز و وضعیت واکنش‌های شیمیایی در لوله‌ها و غیره باشد. بنابراین، تغییرات ریزساختاری لوله‌ها در هر کوره می‌تواند با هم متفاوت باشد.
- ریفرمر F3 تغییرات سیگنال EC کمتری نسبت به دو ریفرمر F1 و F2 دارد. تغییرات F1 و F2 نسبتاً مشابه یکدیگر هستند. شباهت سیگنال‌های F1 و F2 می‌تواند مربوط به تغییرات جزئی در فناوری نصب و حتی بهره‌برداری باشد.
- با افزایش زمان کارکرد یا آسیب‌های ریزساختاری، مقادیر X_L و R_X به شکل معکوس تغییر می‌کنند. X_L افزایش و R_X کاهش می‌یابد، زیرا کربوریزاسیون در طول کارکرد، نفوذ پذیری را افزایش و رسانایی ماده مورد بررسی را کاهش می‌دهد. لازم به ذکر است که لوله‌هایی با مقدار X_L بالاتر از X_L نقطه هوا (نقطه مبنا) نشان‌دهنده

می‌یابد، کربوریزاسیون می‌تواند افزایش یا بد. بنابراین، کربوریزاسیون (دوده زدن) می‌تواند آسیب جدی و حتی برگشت‌ناپذیری به کاتالیزورها و لوله‌های کاتالیزور در لوله‌های ریفرمر وارد کند.

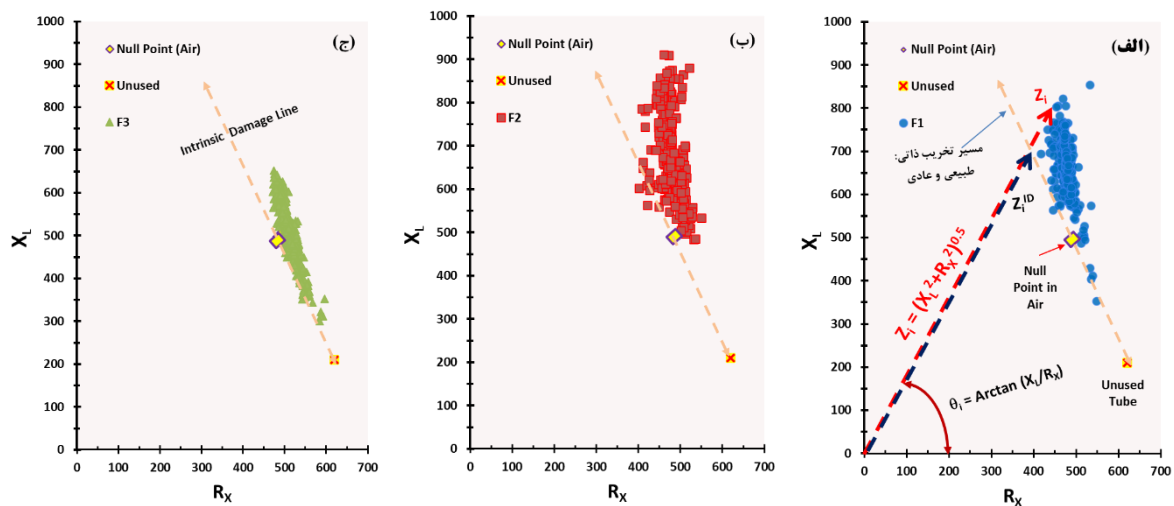
به دلیل جذب کربن و دمای بالا، کاربیدهای یوتکتیک $M_{23}C_6$ به کاربیدهای M_7C_3 تبدیل می‌شوند که مقدار Cr بیشتری دارند (همان‌طور که در شکل ۶ الف نشان داده شده است). علاوه بر این، کاربیدهای یوتکتیک M_7C_3 با هم ادغام می‌شوند و مورفولوژی لایه‌ای آنها در طول سرویس به اسکلتی تبدیل می‌شود. علاوه بر این، شکل و کسر حجمی کاربیدها افزایش می‌یابد. همچنین، کاربیدهای ثانویه خاصی در مناطق دندریتی تشکیل می‌شوند و یک ساختار بلوکی مانند در داخل زمینه آستنیتی ایجاد می‌کنند. ریزساختار پیر شده ترکیبی از رنگ‌های خاکستری تیره و روشن را نشان می‌دهد که سایه‌های روشن نشان‌دهنده کاربیدهای غنی از نیوبیم واقع در مرزهای دندریتی و سایه‌های تیره نشان‌دهنده کاربیدهای غنی از کروم از نوع M_7C_3 است.

همان‌طور که در شکل ۶ ب نشان داده شده است، زمینه به طور قابل توجهی از کروم تخلیه شده است. کاربیدهای $M_{23}C_6$ به M_7C_3 تبدیل شدند و کاربیدهای NbC تا حدی به کاربید غنی از کروم تبدیل شدند که هر دو احتمالاً به تخلیه کروم زمینه کمک می‌کنند. نتایج حاضر نشان می‌دهد که محلول اچ به زمینه آستنیتی که مقدار کروم آن کاهش یافته، حمله می‌کند. ظاهر متخلخل کاربیدهای M_7C_3 به دلیل تشکیل آن از $M_{23}C_6$ تو سط یک واکنش یوتکتوئیدی در حین کربوریزاسیون است:



علاوه بر این، M_7C_3 ، کاربید غنی از کروم (همان‌طور که در شکل‌های ۶ الف و ۶ ج نشان داده شده است)، می‌تواند در طول فرآیند کربوریزاسیون رشد کند. سپس، مقدار Cr زمینه می‌تواند کاهش یابد (همان‌طور که در شکل ۶ ب نشان داده شده است).

از طرف دیگر، لوله‌های آلیاژی HP در شرایط ریختگی پارامغناطیس هستند [۱۹، ۲۳، ۲۴]. رسوب و رشد کاربیدهای کروم باعث تخلیه کروم در زمینه آستنیتی می‌شود. بنابراین، با افزایش کربوریزاسیون، ترکیب زمینه به



شکل ۷) نمودارهای صفحه امپدانس به دست آمده از بازرسی جریان گردابی ۱۰۰۰ لوله کاتالیستی (HP40Nb) در سه کوره ریفرمر بخار: (الف - F1=16 سال، ب - F2=13 سال و ج - F3=5 سال)

فازهای مختلف و همچنین وجود کاربیدهای کروم، افزایش در کسر حجمی کاربید، جداسازی عناصر آلیاژی و کاهش کروم در زمینه آستنیتی، باعث تغییراتی در خواص مکانیکی و الکترومغناطیسی می‌شود [۱۰، ۲۷، ۲۸]. مطالعات قبلی لایه کربوریزه شده در لوله ریفرمر را با استفاده از روش‌های مختلف الکترومغناطیسی بررسی کرده‌اند [۲۹، ۳۰]. این مطالعات دریافته‌اند که کاربیدهای کروم در زمینه آستنیتی می‌توانند تغییرات مغناطیسی مشاهده شده را توجیه کنند. این یافته‌ها با نتایج مطالعه حاضر هم‌خوانی دارد [۳۱، ۳۲]. کربوریزاسیون فرآیند شیمیایی اولیه است و به دنبال آن پیرسازی و تخریب خزشی به عنوان تغییرات ریزساختاری بعدی رخ می‌دهند [۱۰، ۳۳].

زمینه آستنیتی Fe-Cr-Ni در حالت پارامغناطیس قرار دارد. در نتیجه پیرسازی و کاهش کروم از زمینه لوله‌های با عمر بیشتر، سیستم به یک سیستم دو تایی Fe-Ni تبدیل می‌شود. این وضعیتی است که با فرومغناطیس مشخص می‌شود [۳۴، ۳۵].

لوله‌هایی که بیشترین تعداد تغییرات ریز ساختاری را به دلیل سن یا کربوریزاسیون تجربه می‌کنند، شامل تشکیل کاربیدهای بلوکی درشت و فشرده و بزرگ شدن کاربیدهای ثانویه هستند که سیگنال‌های فرومغناطیسی را تقویت می‌کنند. با افزایش مدت زمان بهره‌برداری و رسوب لایه‌های

وجود مقدار کمی خاصیت فرومغناطیسی است که وقوع پدیده پیرسازی بیش از حد را تأیید می‌کند [۲۵، ۲۶].

- تغییرات X_L و R_x به صورت خطی تغییر می‌کنند، به ویژه در مراحل اولیه پیرسازی، همانطور که در شکل ۷ ج نشان داده شده است. تغییرات خطی می‌تواند مربوط به تغییرات ذاتی ریزساختار ناشی از پدیده‌های پیرسازی مانند کربوریزه شدن باشد که بعداً مورد بحث قرار می‌گیرد.
- سیگنال‌های جریان گردابی بسیاری از لوله‌ها از تغییرات خطی نشان داده شده به صورت مسیر تخریب ذاتی (شکل ۷ الف)، منحرف می‌شوند. این می‌تواند مربوط به تشکیل حفرات و ترک‌های ریز ناشی از پدیده خزش باشد (که در شکل‌های ۵ الف و ۵ ب نشان داده شده است). این انحرافات می‌توانند با افزایش زمان کارکرد و افزایش ترک‌های ریز در سطح یا زیر سطح افزایش یابند. می‌توان در نظر گرفت که ترک‌های سطحی باعث انحرافات بیشتری نسبت به ترک‌های زیرسطحی و عمیق می‌شوند.
- همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده است، برخی از لوله‌ها در F1 سیگنال جریان گردابی بسیار پایینی دارند، زیرا چندین لوله در چهار سال گذشته تعویض شده‌اند. [از این لوله‌ها برای کالیبره کردن ECT استفاده شد]. تغییرات متالورژیکی، مانند تغییر شکل، اندازه و توزیع

می‌شوند. این آسیب را می‌توان با تجزیه و تحلیل تغییرات امیدانس با استفاده از معادله ۱۰ تخمین زد.

$$D_{II}^i = 100 \sqrt{\left(\frac{Z_i - Z_i^{ID}}{Z_i^{ID}}\right)^2} \quad (10)$$

که Z_i نشان‌دهنده مقدار امیدانس لوله بررسی شده است، در حالی که Z_i^{ID} مقدار امیدانس مربوطه را نشان می‌دهد در صورتی که لوله فاقد حفره یا ترک باشد. این مقدار از خط آسیب ذاتی نشان‌داده شده در شکل ۷-الف به دست آمد. معادله ۱۱ جزئیات معادله مسیر تخریب ذاتی را شرح می‌دهد. از معادلات ۱۲ و ۱۳ برای محاسبه $(R_X^{ID})_i$ و $(X_L^{ID})_i$ استفاده شده است. مقادیر امیدانس هر لوله با استفاده از معادله ۱ تعیین شده است. می‌توان در نظر گرفت که مقادیر θ و Z به طور همزمان با زمان سرویس افزایش می‌یابند.

$$(X_L^{ID})_i = -2.2(R_X^{ID})_i + 1575 \quad (11) \quad \text{خط تخریب ذاتی}$$

$$(R_X^{ID})_i = \frac{1575}{[2.2 + \left(\frac{X_L}{R_X}\right)_i]} \quad (12)$$

$$(X_L^{ID})_i = (R_X^{ID})_i \left(\frac{X_L}{R_X}\right)_i \quad (13)$$

برای ارزیابی درجه کل آسیب هر لوله، D_{Total}^i یک معادله مبتنی بر تجربه (معادله ۱۴) پیشنهاد می‌شود که بر اساس مقادیر D_{II}^i و D_I^i است. در این رویکرد فرض می‌شود که هر دو نوع آسیب دارای احتمال برابری در ایجاد آسیب کلی است.

$$D_{Total}^i = \frac{50D_I^i + 50D_{II}^i}{100} \quad (14)$$

جدول ۴ درجات آسیب سه ریفورمر را در دو مشخصه مختلف (میانگین ۳۳۶ لوله و حداکثر لوله آسیب‌دیده) در هر کوره را ارائه می‌کند. این تخمین بر اساس برآوردهای انجام شده با کرنش سنجی لیزری جدول ۱، صحنه‌گذاری شده است.

اکسید روی سطح بیرونی لوله‌ها، رسانایی الکتریکی نمونه‌ها کاهش می‌یابد [۳۶]. این پدیده را می‌توان به افزایش ایجاد نواحی با خواص مغناطیسی قوی و توسعه لایه‌هایی متشکل از اکسیدها در نمونه‌ها نسبت داد. علاوه بر این، باعث تجزیه رسوبات می‌شود و مقاومت در برابر حرکت دیواره حوزه مغناطیسی را کاهش می‌دهد. در نتیجه، تغییرات در ریزساختار منجر به تغییراتی در نفوذپذیری مغناطیسی و رسانایی الکتریکی می‌شود که با استفاده از آزمایش جریان گردابی ارزیابی می‌شوند. به دلیل شرایط کاری سخت و طولانی در دماهای بالا و تغییرات متالورژیکی ناشی از آن، هر لوله دارای ویژگی‌های الکترومغناطیسی متمایزی است. مشاهده شد که این لوله‌ها در هنگام کارکرد در دوره‌های طولانی و با تغییرات در ریز ساختار، همانطور که برای کاربرد مورد نظرشان پیش‌بینی می‌شود، واکنش‌های الکترومغناطیسی متنوعی از خود نشان می‌دهند [۳۷، ۳۸].

۳-۳ ارزیابی شدت آسیب

بر اساس نتایج قبلی، دو نوع آسیب به صورت متوالی در طول سرویس رخ می‌دهند. آسیب نوع اول، که با D_I نشان داده می‌شود، مربوط به آسیب‌های ذاتی (طبیعی) ناشی از اکسیداسیون و کربوریزاسیون است. این آسیب را می‌توان با استفاده از معادله ۹ تخمین زد که بر اساس پارامترهای زاویه فاز، θ است (برای جزئیات بیشتر به معادله ۲ مراجعه کنید). همانطور که در شکل ۷-الف نشان داده شده است، مشخص است که با افزایش آسیب، مقدار θ از ۱۸٫۷ درجه به ۶۳٫۲ درجه افزایش می‌یابد.

$$D_I^i = 100 \left(\frac{\theta_i - \theta_{new}}{\theta_{max} - \theta_{new}} \right) = 100 \left(\frac{\theta_i - 18.7}{63.2 - 18.7} \right); \text{ that "i" is tube no.} \quad (9)$$

که $\theta_{new} = 18.7^\circ$ و θ_i مقادیر زاویه فاز لوله‌های جدید و بررسی‌شده هستند و θ_{max} مربوط به حداکثر مقدار مشاهده شده است که ۶۳٫۲ است (زوایای فاز با استفاده از معادله ۲ محاسبه می‌شوند).

آسیب نوع دوم، D_{II} ، با ریزحفره‌ها و ترک‌هایی مرتبط است که با پیشرفت آسیب اول و در اثر پدیده خزش ایجاد

جدول ۴) خلاصه درجات آسیب سه کوره ریفورمر

نمونه با حداکثر خرابی			مقدار متوسط			حداکثر خرابی نوع دوم، Max. D _{II} (لوله تعویض شده)	حداکثر خرابی نوع اول، بدون خرابی نوع دوم (روی مسیر تخریب ذاتی)	لوله نو	شاخص
F3	F2	F1	F3	F2	F1				
596	550	547	476	478	519	535	377	620	R _x
652	911	855	660	673	497	1008	745	210	X _L
883	1064	1015	814	825	719	1145	835	655	Z
48	59	57	54	55	44	62	63.2	18.7	θ (degree)
708	790	776	750	754	690	823	835	655	Z ^D
65	90	87	80	81	56	98	100	0	D _I
25	35	31	8	10	4	39	0	0	D _{II}
45	63	59	44	45	30	68	50	0	D _{Total}

می‌شود. این انحراف با رسم مسیر تخریب ذاتی یا طبیعی روی صفحه امیدانسی به خوبی نشان داده شد.

شاخص تغییرات امیدانس نسبت به مسیر تخریب ذاتی می‌تواند معیاری برای ارزیابی تخریب‌های ناشی از رشد ترک‌های خزشی باشد.

ارزیابی تخریب کل برای تعیین عمر باقیمانده می‌تواند ترکیبی از دو شاخص زاویه فازی و امیدانس باشد که براساس رابطه تجربی ۱۴ ارائه شده است.

۵- تشکر و قدردانی

از روابط بین‌الملل دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل به خاطر حمایت‌های لازم از این تحقیق صمیمانه تقدیر می‌شود.

۶- تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۷- منابع

- [1] Raghavendra K., Venkatesh V., Madan M., Sujata M., Bhaumik S.K. (2022) Failure analysis of a cracked hydrogen reformer tube. Transactions of the Indian National Academy of Engineering 7.2: 689-697.
- [2] Raj A., Goswami B., Kumar S.B., Krishna G., Roy N.,

۴- نتیجه‌گیری

این مطالعه کارایی روش غیرمخرب جریان گردابی (ECT) برای ارزیابی شدت و نوع آسیب در لوله‌های ریفورمر HP40Nb را نشان داد. یک ارتباط واضح بین تخریب ریزساختاری و تغییرات در پاسخ‌های جریان گردابی ارائه شد.

در این روش دو نوع آسیب ذاتی (DI) ناشی از اکسیداسیون/کربوریزاسیون و آسیب خزشی (DII) ناشی از ایجاد ریزحفره‌ها/ترک‌ها، به ترتیب با استفاده از دو شاخص الکترومغناطیسی زاویه فاز و تغییرات امیدانس مشخص شد (روابط ۹ و ۱۰).

مشاهده شد که تغییرات زاویه فازی بین ۱۸/۷ تا ۶۳/۲ درجه است که با افزایش میزان کربوره شدن و کاهش مقدار کروم محلول در فاز زمینه و تبدیل کاربیدهای M₂₃C₆ به M₇C₃ افزایش می‌یابد.

با افزایش زمان بهره‌برداری و افزایش عیوب ناشی از کربوره شدن، مقدار زاویه فازی حداکثر به میزان ۶۳/۸ درجه افزایش می‌یابد.

با افزایش بیشتر عمر لوله‌ها در سرویس و تقویت شرایط جوانه‌زنی و رشد ترک‌های خزشی در اطراف کاربیدها و ناخالصی‌ها، انحراف در رفتارهای الکترومغناطیسی مشاهده

- devices. Fusion Engineering and Design 202: 114396.
- [16] Brandao A.C.P.S., Almeida L H, Soares I A, Pacheco CJ, Pereira GR, (2024) Portable eddy current inspection system with real-time svm classification of the aging states of steam reforming furnace tubes, e-Journal of Nondestructive Testing.
- [17] EDDYWISE NDT, IH-ECP Portable Eddy Current Instrument. (2024). [Online]. Available: <https://www.eddywise.com/en/productdetail.aspx/50/IH-ECP#summary>
- [18] Zhao Z., Cao Y., Wan X., Li J., Li G. (2022) Effect of cooling rate on carbide characteristics of the high vanadium high-speed steel. ISIJ International 62.3:524-531.
- [19] McLeod A.C. (2016) Carburized ethylene pyrolysis tubes: an analysis of the relationship between microstructure, creep performance, and magnetic response. PhD Thesis, University of Canterbury.
- [20] Ray A., Raj A., Goswami B., Ray A.K. (2015) Damage mechanism of service exposed reformer tubes in petrochemical industries-a review, International Journal of Engineering and Technical Research (IJETR) 3,10: 1-11.
- [21] Tse M.C.H., Livera E.R., Christofidou K.A. (2024) Metallurgical developments in steam-methane reformer tube alloys. Materials Science and Technology 02670836241262199.
- [22] Snoeck W., Froment G.F., Fowles M. (2002) Steam/CO₂ reforming of methane. carbon filament formation by the boudouard reaction and gasification by CO₂, by H₂, and by steam: kinetic study, Industrial & Engineering Chemistry Research 41,17: 4252-4265.
- [23] Yosefpour-Shirsavar K., Abbasi M., Hosseinipour S.J. (2023) Investigation of microstructure and magnetic properties of HP40-NB reformer tubes. Materials Evaluation 81.5:31-40.
- [24] Wang F., Northwood D.O. (1993) The effect of carbon content on the microstructure of an experimental heat-resistant steel. Materials characterization 31.1: 3-10.
- [25] Gang W et al. (2023) Carburization-induced microstructure evolution and hardening mechanism of 18CrNiMo7-6 steel. Journal of Materials Research and Technology 25:1649-1661.
- [26] Deng H., Liu B., Guo Y., Guo Y.P., Yu H. (2021) Effect of local equivalent stress on fatigue life prediction of carburized Cr-Ni alloy steel based on evaluation of maximum crack sizes. Engineering Fracture Mechanics 248:107718.
- Ray A.K. (2014) Damage analysis of service exposed reformer tubes in petrochemical industries, High Temp. Mater. Proc.; 33(3): 201–216.
- [3] Thibaut D. et al. (2021) Effect of high temperature service on the complex through-wall microstructure of centrifugally cast HP40 reformer tube. Materials Characterization 177: 111070.
- [4] Song R., Wu S. (2018) Microstructure evolution and residual life assessment of service exposed Cr35Ni45 radiant tube alloy. Engineering Failure Analysis 88: 63-72.
- [5] Krishnan M.A., Prasad N.K., Barla N.A. (2023) High-temperature failure analysis of 25Cr35NiNb tube. Engineering Failure Analysis 153:107566.
- [6] Dobrotvorskaia A.N., et al. (2022) Failure cause assessment of steam reformer radiant tube after long-term service. Materials and Corrosion 73.8: 1265-1273.
- [7] Lissarrague S., Humberto M., Lanz C.A. (2022) NbC transformation during aging in HP40-Nb heat resistant alloy. 28,3:147-150.
- [8] Ali K.B., Abdalla A.N., Rifai D., Faraj M.A. (2017) A review on system development in eddy current testing and technique for defect classification and characterization. IET Circuits, Devices & Systems 11.4: 338-351.
- [9] Arenas MP, et al (2018) Novel austenitic steel ageing classification method using eddy current testing and a support vector machine. Measurement 127:98-103.
- [10] McLeod A.C., et al. (2015) Microstructure and carburization detection in HP alloy pyrolysis tubes. Metallography, Microstructure, and Analysis 4: 273-285.
- [11] Kazempour-Liasi H., Lalegani Z., Rayatpour M. (2021) Life assessment of HP-40Nb reformer furnace tube of a petrochemical plant. Strength Mater 53, 364–375.
- [12] Chiablam C., Poopat B., Noipitak M., Heyrman S. (2024) Eddy current analysis for predicting deterioration stages in alumina former radiant coils. Engineering Failure Analysis 158: 107943.
- [13] Amitava G., Robi P.S. (2015) High-temperature deformation behavior of HP40Nb micro-alloyed reformer steel. Metallography, Microstructure, and Analysis 4:508-517.
- [14] Gaur B (2017) Damage analysis and integrity assessment of a few steam-reformer components at a syn-gas plant. Mechanics & Industry 18.4: 401.
- [15] Yao R, Skilton R (2024) A review of pipe cutting, welding, and NDE technologies for use in fusion

Chemistry and Physics 133,2-3:1018-1023.

- [27] Deng Z., Li T., Zhang J., Song X., Kang Y. (2022) A magnetic permeability perturbation testing methodology and experimental research for deeply buried defect in ferromagnetic materials. *NDT&E International* 131:102694.
- [28] Asadi A., Abbasi M., Shamgholi M. (2016) Eddy current detection of retained austenite in Ni-Hard4 cast iron. *Research in Nondestructive Evaluation* 29,1:38-47.
- [29] Lei Z, Davis C., Kok P. (2021) Steel microstructure-magnetic permeability modelling: the effect of ferrite grain size and phase fraction. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 519: 167439.
- [30] Arenas MP, et al (2018) Magnetic evaluation of the external surface in cast heat-resistant steel tubes with different aging states. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 456: 346-352.
- [31] Lopez JEC et al. (2018) Development of a magnetic sensor for detection of moderate carburization damages in heat-resistant HP-Nb tubes of steam reforming furnaces. *Journal of Materials Research and Technology* 7.3: 371-375.
- [32] Khodamorad S.H., and Haghshenas D.F. (2012) Inspection of carburization and ovalness in ethylene cracking tubes by using a semi-robot. *Engineering Failure Analysis* 25:81-88.
- [33] Rodríguez J., Haro S., Velasco A., Colas R. (2000) A metallographic study of aging in a cast heat-resisting alloy. *Materials Characterization* 45.1: 25-32.
- [34] Voicu R., Andrieu E., Poquillon D., Furtado J., Lacaze J. (2009) Microstructure evolution of HP40-Nb alloys during aging under air at 1000 C. *Materials Characterization* 60.9:1020-1027.
- [35] Guo J., Cao T., Cheng C., Meng X., Zhao J. (2020) Effect of carburization (pyrolysis furnace tube main failure factor) on the microstructure and properties of HP-Nb alloy tube. *Engineering Failure Analysis* 115: 104610.
- [36] Alvino A., Lega D, Giacobbe F., Mazzocchi V., Rinaldi A. (2010) Damage characterization in two reformer heater tubes after nearly 10 years of service at different operative and maintenance conditions. *Engineering Failure Analysis* 17,7-8:1526-1541.
- [37] Andrade A.R., Bolfarini C., Ferreira L.A.M., Vilar A.A.A., Filho C.D.S., Bonazzi L.H.C. (2015) Influence of niobium addition on the high temperature mechanical properties of a centrifugally cast HP alloy. *Materials Science and Engineering: A* 628: 176-180.
- [38] Sustaita-Torres I.A, et al. (2012) Aging of a cast 35Cr-45Ni heat resistant alloy. *Materials*