



مروری بر اثرات عیوب ترکیبی ترک خوردگی تنش در فولادها

رضا نوبدنزاد^۱، شهرام شهروئی^{۲*}، عرفان میرشکاری^۲، پژمان تقی‌پور بیرگانی^۲

۱. دانشجوی دکتری گروه مهندسی مکانیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

۲. گروه مهندسی مکانیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

*نویسنده مسئول: shahramshahrooi@iauhvaz.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۱۹

چکیده

ترک خوردگی تنش عنوان یک تهدید مهم برای صنایع فولادی می‌باشد. هنگامی که شرایط خاصی در محیط فولاد ایجاد می‌شود، بارگذاری این عیب منجر به ترک بین دانه‌ای در صفحه شعاعی-محوری می‌شود. این ترک‌ها می‌توانند تحت بارگذاری نامطلوب پیوسته رشد کنند و در نهایت منجر به پارگی شوند. در این خصوص تحقیقات و آزمایشات زیادی انجام شده است. این مقاله، مروری است بر ترکیب شرایط حاکم بر فولادها که منجر به رشد ترک خوردگی تنش می‌شوند. شکست‌های ناشی از ترک خوردگی تنش در یک بازه طولانی در طی چند مرحله همچون جوانه زنی، رشد ترک و شکست نهایی رخ می‌دهد. از طرفی ترک خوردگی تنش به شرایط محیطی، متالورژیکی و مکانیکی وابسته است. لذا در این مقاله بررسی شرایط بارگذاری در هر مرحله از ترک خوردگی تنش و تأثیرات تنش تکرار شونده بر روی فولادها و همچنین اثرات هم‌افزایی پارامترهای مختلف در طول کل چرخه عمر فولادها نیز مورد بحث قرار گرفته است. تمرکز اصلی این بررسی، مرتبط کردن شرایط بارگذاری در هر مرحله از انتشار ترک است که نقش مهمی در تخمین عمر باقی‌مانده فولادها حساس به ترک خوردگی تنش را ایفا می‌کند. در انتها مدل‌سازی رشد ترک خوردگی تنش مورد بحث و بررسی قرار گرفت و پیشنهاداتی همچون تحلیل شکست به‌واسطه رشد ترک خوردگی تنش بر روی ورق‌ها داده شده است.

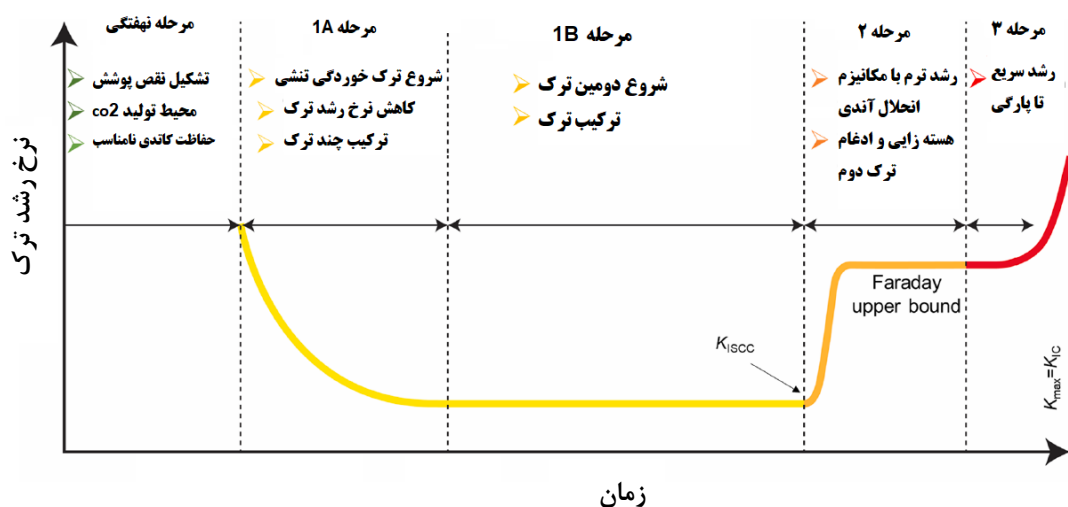
کلمات کلیدی: خوردگی تنش، خستگی، فولاد، رشد ترک.

مقدمه

اهمیت و توجه مقاله حاضر در ارائه یک نمای کلی از ترک خوردگی تنش بین‌دانه‌ای فولادها است. اولین خرابی مستند ناشی از ترک خوردگی تنش فولاد در محیط اسیدی بالا در خط لوله انتقال گاز فشار بالا در ناچیتوچ، لوئیزیانا، ایالات متحده آمریکا می‌باشد [۱ و ۲]. از آن زمان، شکست‌های مشابه‌ای در سراسر جهان گزارش شد، اما به مراتب تعداد مرگ و میر کمتر بود. بیشتر حوادث ترک خوردگی تنش فولادها در محیط اسیدی بالا در خطوط لوله پوشش داده شده با جریان کاتدی و در ۳۰ کیلومتر اول پایین دست کمپرسور یا ایستگاه پمپ در خطوط لوله گاز یا نفت رخ داده است که در این مکان، خط لوله معمولاً بالاترین دما و شدیدترین شرایط بارگذاری را تجربه می‌کند [۳ و ۴]. نرسورتی [۵] در به بررسی ساختار متالورژیکی مواد پرداخت که در این مطالعه دریافت که هم ناحیه مجاور ترک‌ها و هم دیواره‌های ترک‌ها توسط یک لایه سیاه (مگنتیک یا کربنات آهن) پوشانده می‌شود. جک و همکاران [۶] در پی بررسی زمان شکست به این نتیجه رسید که اگر پوشش لوله از هم گسیخته شده باشد و هم‌زمان ترک‌های خوردگی تنش در معرض یک محلول آبی از غلظت‌های بالای یون‌های کربنات-بی کربنات و نمک‌های رسوب‌شده قرار گیرند، در چنین موقعیتی حفاظت کاتدی تا حدی در زیر پوشش از بین رفته است. زادو [۷] در بررسی نحوه رشد ترک در موضوع خوردگی تنش دریافت که خرابی‌های ترک خوردگی تنش از طریق تجمع ترک‌های بین دانه‌ای در جهت طولی رخ می‌دهد. پارکینز [۸] ثابت کرد که ترک خوردگی تنش در فولاد یک پدیده مخرب وابسته به زمان است که با ترکیب اثرات هم‌افزایی مواد، محیط و تنش کششی، ایجاد این پدیده رخ می‌دهد. شکل (۱) مدلی از رفتار وابسته به زمان ترک خوردگی تنش در فولادها را نشان می‌دهد که به مدل وان حمام معروف است. نیازی و همکاران [۹] مدل پارکینز را اصلاح کردند و در پنج مرحله متوالی در ترک خوردگی تنش که در زیر به اختصار مورد بحث قرار می‌گیرند تقسیم کردند.



- مرحله نهفتگی: این مرحله شامل تشکیل یک محیط نیمه مسدود (محلول آبی با غلظت بالا کربنات و بی کربنات) در زیر پوشش است که موجب از بین رفتن جزئی حفاظت کاتدی و خوردگی حفره‌ای است.
- مرحله 1A: این مرحله شامل شروع ترک از طریق انحلال در مرزهای دانه‌ای است که تنش‌های محلی بیشتر از مقدار آستانه برای شروع ترک هستند. مقدار آستانه به شرایط سطح (مانند عیوب سطح، زبری سطح، تنش پسماند سطح، و غیره) و بزرگی و نوسانات بار اعمال شده بستگی دارد. سرعت رشد ترک به تدریج کاهش می‌یابد و ترک‌ها به صورت پراکنده رشد می‌کنند و ممکن است رشد خود را متوقف کنند.
- مرحله 1B: ترکیب ترک‌های کوچک در چندین مکان ادامه می‌یابد و مشابه مرحله قبل رشد می‌کند. با این حال، ترک‌های مجاور پیدا می‌شوند که به هم می‌پیوندند و ترک‌های بزرگ‌تری را تشکیل می‌دهند. بر این اساس، نرخ رشد ترک در این مرحله تصادفی است و ترک‌ها ممکن است دوره‌های خواب و فعالیت متناوب را تجربه کنند. مکان‌های شروع ترک و تعامل بین میدان‌های تنش ترک‌های مجاور بر رشد ترک در این مرحله تأثیر می‌گذارد.
- مرحله ۲: این مرحله با رشد ترک پایدار از طریق مکانیسم انحلال آندی در حضور تنش‌های کافی مشخص می‌شود. نرخ رشد ترک در این مرحله از قانون توان با نرخ کرنش نوک ترک پیروی می‌کند و می‌تواند با پارامترهای مکانیک شکست مانند ضریب شدت تنش مرتبط باشد. مرز بالایی برای انتشار ترک را می‌توان با قانون دوم فارادی محاسبه کرد زیرا رشد ترک با انحلال آندی است.
- مرحله ۳: رفتار رشد ترک در این مرحله بسیار سریع است و ممکن است ناپایدار باشد. فولاد ترک خورده با ترک خوردگی تنش‌ی باید تا قبل از شروع این مرحله تعویض یا تعمیر شود. در غیر این صورت، انتشار سریع ترک در این مرحله ممکن است باعث شکست شود و این امر برای انسان، محیط زیست، زیرساخت‌ها خطرناک است.



شکل ۱: تصویر از شروع و رشد ترک خوردگی تنش‌ی وابسته به زمان [۹]

تا به امروز تحقیقات زیادی برای درک پارامترهای محیطی، متالورژیکی و مکانیکی موثر بر پدیده ترک خوردگی تنش‌ی انجام شده است [۱۰-۱۲]. بررسی‌های موجود نگرش خوبی در مورد شناخت این پدیده ارائه می‌دهد. نکته‌ای که در اینجا بسیار حائز اهمیت است این است که در بررسی‌های انجام گرفته، توجه کمتری به تعامل و رابطه میان پارامترهای هر مرحله شده است. از آنجایی که هدف کلی مدل‌سازی ترک خوردگی تنش‌ی، پیش‌بینی تقریباً دقیق طول عمر قابل اعتماد در فولادهای آسیب‌پذیر است، لذا درک روابط بین پدیده‌هایی که ممکن است در هر مرحله رخ دهد بسیار مهم و حیاتی است. مقاله حاضر، اقدام به گردآوری و تحلیل ترک خوردگی تنش‌ی در فولادها از جنبه‌های مختلف و تعامل بین پارامترها در هر مرحله با تأکید بیشتر بر



شرایط بارگذاری مکانیکی و مدل‌های بارگذاری تجربه‌شده نموده است. همچنین، این مقاله شکاف‌های باقیمانده در حوزه ترک خوردگی تنش را مشخص کرده و زمینه‌های تحقیقاتی آینده را برای بهبود مدل‌سازی ترک خوردگی تنش پیشنهاد می‌کند.

مرحله نهفتگی

مجموعه‌ای از سه رویداد که به هم مرتبط هستند برای این مرحله ضروری است:

(۱) ایجاد یک محیط قوی برای ترک خوردگی تنش به صورت ویژه در محیط بی‌کربنات کربنات با غلظت بالا همراه با از دست دادن جزئی حفاظت کاتدی در زیر پوشش جدا شده رخ می‌دهد. این شرایط حفاظت کاتدی و دمای محلی بالاتر ممکن است اثرات محیط (غلظت) بیشتر شود.

(۲) تغییر فشار داخلی در طول عملیات منجر به تغییرات خواص مکانیکی (سخت شدن یا نرم شدن)، ساختار سطحی (تغییر در مقیاس کوچک و ساختارهای معیوب)، و تنش‌های پسماند در فولاد می‌شود.

(۳) تغییرات در ساختار سطح فولاد عمدتاً به دلیل فرآیندهای الکتروشیمیایی ناشی از محیط (خوردگی) می‌گردد.

تشکیل محیط ترک خوردگی تنش

محیط قوی برای ایجاد ترک خوردگی تنش متشکل از یک محیط بسته در زیر پوشش شکسته فولاد می‌باشد که ناشی از غلظت بالای یون‌های کربنات-بی‌کربنات است (محلول استاندارد برای آزمایش‌های آزمایشگاهی ترک خوردگی تنش، محلول آبی ۰/۵ مولار سدیم کربنات و ۱ مولار سدیم هیدروژن کربنات است). این محیط با از دست دادن جزئی حفاظت کاتدی در عیوب سطحی محافظ پوشش رخ می‌دهد. به عنوان نمونه اگر برای خطوط لوله در نظر گرفته شود، تشکیل چنین محیطی به عوامل متعددی از جمله خواص پوشش، دما، شیمی خاک، pH آب‌های زیرزمینی، واکنش‌های الکتروشیمیایی، نرخ‌های نفوذ اکسیژن و دی‌اکسید کربن به ناحیه جدا شده و حضور کاتیون‌ها و آنیون‌های مورد نیاز در زیر پوشش بستگی دارد. از این‌رو، ایجاد محیط ترک خوردگی تنش در این زمینه زمان‌بر است و زمان‌بندی برای مکان‌ها، پوشش‌ها و دمای محیط متفاوت است. یک مکانیسم ساده برای تولید این محیط در زیر مورد بحث قرار گرفته است.

تغییرات در خواص لوله‌ها و تنش‌های داخلی

بیشترین تنش در فولاد خط لوله معمولاً تنش حلقه است و ناشی از فشار داخلی سیال در خط لوله است [۱۳ و ۱۴]. نوسان در فشار داخلی لوله باعث می‌شود خطوط لوله تحت بارگذاری چرخه‌ای با دامنه متغیر یا بار خستگی کار کنند. سطح فشار نسبی و بارگذاری بزرگ در طول خط لوله متفاوت است [۱۵ و ۱۶].

بین و همکاران [۱۷] ضمن اشاره به اینکه نمونه‌های واقعی از این شرایط بارگذاری در خطوط لوله گاز و نفت از داده‌های اسکادا کانادا (کنترل نظارتی و جمع‌آوری داده‌ها) رخ داده است، ثابت کردند که این نوع شرایط بارگذاری شامل دو نوع چرخه بار با توجه به نسبت تنش آنها است. این چرخه‌ها به‌عنوان چرخه‌های با نسبت تنش پایین پراکنده که به عنوان چرخه‌های زیر بار شناخته می‌شوند و چرخه‌های با نسبت تنش بالا، که سیکل‌های فرعی نامیده می‌شوند دسته‌بندی می‌شوند. اطلاعات مربوط به انواع دیگر نوسانات فشار در امتداد فولادهای خط لوله را می‌توان در جاهای دیگر یافت.

تغییرات در وضعیت سطح

در مرحله اولیه، سطح خط لوله می‌تواند از چندین جنبه تغییر کند. اول، شکستگی موضعی که به دلیل تغییر شکل پلاستیک ایجاد شده توسط شکل موج‌های بارگذاری دامنه متغیر رخ دهد. ثانیاً، خوردگی موضعی می‌تواند در نزدیکی نقص‌های پوشش رخ دهد. جایی که آب زیرزمینی یا محیط خورنده با سطح بیرونی لوله در تماس است، به‌ویژه در ناپیوستگی‌های متالورژیکی مانند آخال‌ها. در حالت ثانویه، یک سلول گالوانیکی با لایه اکسید شده کاتدی تشکیل می‌شود و خوردگی فولاد را تسریع می‌کند. خوردگی ذرات در سطح منجر به تشکیل گودال می‌شود. این فرآیندهای الکتروشیمیایی ممکن است قبل از ایجاد یک محیط ترک خوردگی تنش رخ دهند [۱۸]. خوردگی موضعی نیز ممکن است قبل از تولید محیط ترک خوردگی تنش رخ دهد.



همانطور که قبلاً ذکر شد، بارگذاری چرخه‌ای قبل از وجود یک محیط خورنده می‌تواند باعث تسریع خوردگی و تشکیل ترک‌های ریز در ناپیوستگی‌های متالورژیکی شود.

مرحله 1A: شروع ترک و رشد ترک در مراحل اولیه

خوردگی بین دانه‌ای به محض تشکیل یک لایه غیرفعال در نوک، نفوذ خوردگی بین دانه‌ای متوقف می‌شود. مکانیسم شروع و رشد ترک بر شکستگی لایه غیرفعال شکننده در امتداد مرزهای دانه است که از تغییر شکل پلاستیک موضعی ناشی از اعمال بار و یا سایر منابع تنش ایجاد می‌شود. برای شروع ترک، پیشرفت بیشتر در خوردگی بین دانه‌ای (در امتداد سطح خارجی و همچنین در جهت عمق) با ترک بین دانه‌ای رخ می‌دهد. شروع و رشد ترک با برهمکنش هم افزایی مواد، محیط و شرایط بارگذاری مکانیکی رخ می‌دهد. ترکیب ماده-محیط، میزان خوردگی، سینتیک غیرفعال سازی/غیرفعال سازی مجدد و خواص لایه غیرفعال را تعیین می‌کند. هر گونه پارامتر محیطی یا متالورژیکی که به نفع پایداری فیلم غیرفعال باشد (یا افزایش مقاومت در برابر شکستگی یا تسریع تشکیل فیلم) شروع و رشد ترک را به تاخیر می‌اندازد. همچنین، تعامل بین ماده و بارهای اعمال شده، فرکانس شکست فیلم غیرفعال، شروع ترک و نرخ رشد را تعیین می‌کند. مرحله 1A شامل شروع ترک و رشد ترک در مراحل اولیه است که به طور مستقل در زیر مورد بحث قرار می‌گیرد.

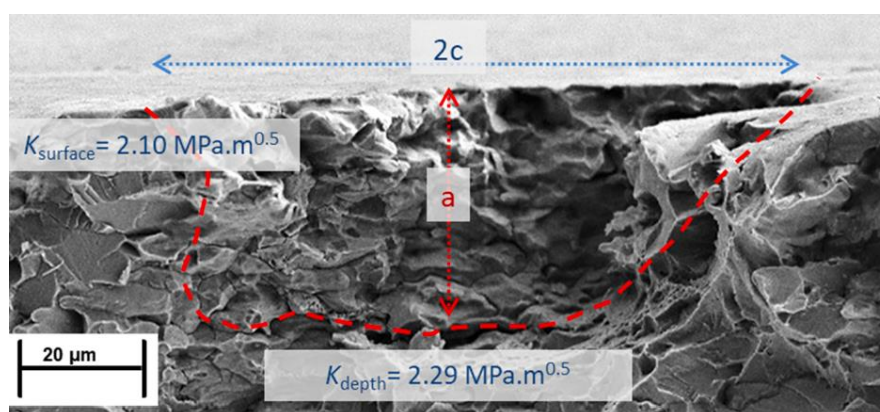
شروع ترک

شروع ترک خوردگی تنشی در شرایطی است که خوردگی بین دانه‌ای به ترک بین دانه‌ای تبدیل شود. شروع انتشار ترک همیشه به عنوان تنش شکست یا کسری از تنش تسلیم گزارش می‌شود و این موضوع در خطوط لوله‌ای که کمتر از حداکثر تنش مجاز (زیر ۸۰ درصد است) نشان داده شده است. در شرایط میدانی و گزارشات ارائه شده، خرابی ترک خوردگی تنشی در تنش حلقه عملیاتی به اندازه ۲۴ درصد حداکثر تنش مجاز گزارش شده است. فسل و همکاران [۱۹] مطالعاتی را در مورد تاثیر افزایش تنش بر روی شکست ترک خوردگی تنشی انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش تنش، احتمال ترک خوردگی تنشی افزایش می‌یابد. تنش عملیاتی برای شروع ترک خوردگی تنشی یک مقدار ثابت نیست و به عوامل متعددی مانند شرایط بارگذاری، تنش پسماند، وجود عوامل افزایش دهنده تنش، شرایط سطح و غیره بستگی دارد. بنابراین، تعیین یک مقدار دقیق برای تنش آستانه برای هر فولاد منفرد دشوار است. با این حال، داده‌های تجربی تحت شرایط کنترل شده در آزمایشگاه، حکایت از روندهایی در تغییر مقدار آستانه دارد. پورازیزی و همکاران [۲۰] به دو موضوع اشاره نمودند، اول اینکه که تنش آستانه به شدت به نوسانات بار وابسته است و تغییر مقدار آستانه را در مقابل نسبت تنش متغیر برای طیف وسیعی از فولادهای خط لوله نشان می‌دهد، جایی که نسبت تنش برابر است با حداقل تنش به حداکثر تنش در چرخه می‌باشد. ثانیاً استحکام تسلیم فولادها تنش آستانه تحت شرایط بارگذاری استاتیکی تقریباً برابر با مقاومت تسلیم فولادها است و تنش آستانه با کاهش نسبت تنش کاهش می‌یابد. کنیتیش [۲۱] در مطالعات خود به این موضوع اشاره کرد که حفره‌های روی سطح خارجی لوله به عنوان افزایش دهنده تنش عمل می‌کنند و ضریب تمرکز تنش در اطراف چاله‌ها هم با عمق گودال و هم با انحنای نوک گودال افزایش می‌یابد. بعد از حفره‌ها، موردی دیگری که نقش مهمی در شروع ترک دارد شرایط سطحی می‌باشد. برای این اقدام تنش آستانه را برای شروع ترک خوردگی تنشی برای سه فولاد مختلف تحت شرایط خوردگی سطحی و صیقل مقایسه گردید. واضح است که ترک‌های خوردگی تنشی در تنش‌های آستانه‌ای پایین‌تر روی سطوح خوردگی سطحی در مقایسه با سطوح صیقلی، سطوح ماشین‌کاری شده و سطوح شات پنینگ شده شروع می‌شوند. ایشان خوردگی سطحی را با اسیدشویی و گریت بلاست برداشت و مشاهده نمود که از بین بردن خوردگی سطحی با اسید شویی هیچ تاثیر مشخصی بر تنش آستانه برای شروع ترک ندارد. از سوی دیگر، مقاومت فولاد در برابر شروع ترک خوردگی تنشی با استفاده از گریت بلاست برای حذف خوردگی سطحی بهبود می‌یابد. این موضوع به احتمال زیاد به این دلیل است که گریت بلاست، تنش‌های فشاری را در لایه زیر خوردگی سطحی ایجاد می‌کند. در نتیجه، تنش‌های موجود برای شروع ترک را تحت تاثیر قرار می‌دهد.



مراحل اولیه رشد ترک خوردگی تنش

ترک‌های تازه شروع شده، نیمه بیضوی هستند که در آن طول ترک در سطح آزاد ($2c$) بیش از دو برابر عمق ترک (a) است. نیازی و همکاران [۲۲] مطابق شکل (۲) به بررسی ترک هسته‌دار در فولاد خط لوله X65 از نقطه نظر مکانیک شکست پرداختند و دریافتند که تنش در مجاورت ناپیوستگی‌های متالورژیکی مانند ترک بین دانه‌ای تشدید می‌شود. نیروی محرکه ترک در نزدیکی نوک ترک را می‌توان با ضریب شدت تنش پیش‌بینی کرد. ضریب شدت تنش نشان دهنده نیروی محرکه مکانیکی موجود برای انتشار یک ترک موجود ناشی از تنش اعمال شده (عمدتاً توسط تنش حلقه) است و به هر دو هندسه ترک، به ویژه ریشه دوم طول ترک و سطح تنش بستگی دارد. برای ترک نشان داده شده در شکل (۲)، ضریب شدت تنش در سطح آزاد ($K_{surface}$) و ضریب شدت تنش در نوک عمق (K_{depth}) مربوط به اعمال بارگذاری حداکثر تنش مجاز ۶۰٪ محاسبه داده شده است.



شکل ۲: ترک تازه شروع شده روی سطح آزاد فولادها [۲۲]

با توجه به ابعاد کوچک شکاف بین دانه‌ای در این مرحله، به ویژه عمق ترک، هر دو ضریب شدت تنش در سطح آزاد و ضریب شدت تنش در نوک عمق نسبتاً کوچک هستند. حداقل ضریب شدت تنش برای رشد ترک پایدار، که به K_{ISCC} معروف است، بسیار بالاتر از مقادیر ضریب شدت تنش در این مرحله است. از این رو، تشدید تنش ناشی از ترک‌های بین دانه‌ای کوچک باعث شکستگی مداوم لایه غیرفعال در مرز دانه نمی‌شود. چن [۲۳] در بررسی تاثیر تغییر هندسه ترک بر ضریب شدت تنش در نوک عمق اندکی به این نتیجه رسید که با افزایش تغییرات در هندسه ترک، ضریب شدت تنش افزایش می‌یابد. با این حال، بسیار پایین‌تر از ضریب شدت تنش در ترک خوردگی تنش باقی خواهد ماند زیرا رشد ترک در جهت عمق در این مرحله محدود است. همانطور که ترک تازه در حال انتشار است، بدنه لوله ممکن است موانعی بر سر راه ترک بین دانه‌ای قرار دهد و اندازه ترک را محدود کند. هنگامی که یک ترک بین دانه‌ای شکل می‌گیرد و منتشر می‌شود، تغییر شکل پلاستیکی موضعی ایجاد می‌کند. کرنش ایجاد شده باعث شکستن فیلم غیرفعال می‌شود و این باعث رشد ترک در مراحل اولیه می‌شود. همانطور که ترک گسترش می‌یابد، ناحیه نزدیک به نوک ترک نفوذی به دلیل تغییر شکل پلاستیک در این ناحیه، به ویژه در نوک عمق، سخت می‌شود. این استدلال مطرح می‌شود که دانه‌های سخت شده اطراف، مقاومت در برابر تغییر شکل پلاستیک بیشتر را افزایش می‌دهند. اگرچه این درست است، اما برای هر ترک در یک ماده سخت کننده کار نیز صدق می‌کند.

مرحله 1B: آماده سازی شرایط برای رشد ترک

وانگ و همکاران [۲۴] نشان دادند این مرحله که بخش بزرگی از طول عمر خط لوله را در بر می‌گیرد، با شروع مداوم ترک‌های کوچک بین دانه‌ای و به دنبال آن ادغام نهایی این ترک‌ها در حین رشد و نزدیک شدن به یکدیگر مشخص می‌شود. در طول این مرحله، رویدادهای شرح داده شده در مرحله 1A در چندین سایت ادامه می‌یابد. اول اینکه تعداد ترک‌ها با افزایش تعداد چرخه بارگذاری، بدون توجه به سطح تنش و فرکانس افزایش می‌یابند. ثانیاً، سرعت هسته‌زایی (جوانه‌زنی) ترک در



تنش‌های بالاتر بیشتر است. با این حال، افزایش‌ها کند می‌شود و تعداد ترک‌ها پس از مدت زمان طولانی قرار گرفتن به یک ثابت می‌رسند. علاوه بر این، نرخ هسته‌زایی ترک در فرکانس‌های بالاتر برای تنش‌های مساوی یا بزرگ‌تر از تنش آستانه بالاتر است. همچنین، دریافتند که تعداد ترک‌ها برای یک دوره زمانی معین برای سطوح دارای خوردگی در مقایسه با سطوح صیقلی مورد استفاده در برخی آزمایش‌های آزمایشگاهی افزایش می‌یابد. اگرچه تعداد نهایی ترک‌ها برابر با تعداد مرز دانه‌ها است، اما این شرط در واقع به دلیل اثرات محافظ ترک‌ها به دلیل افزایش تعداد ترک‌ها و در نتیجه نزدیک‌تر شدن ترک‌ها، در واقع قابل اجرا نیست. سپس، برخی از ترک‌های کوچک‌تر به دلیل اثرات محافظ تنش ترک‌های مجاور بزرگ‌تر، رشد نمی‌کنند. ترک‌ها به درجات مختلفی رشد خواهند کرد، با این حال سرنوشت تقریباً همه ترک‌ها همانطور که در بخش قبل توضیح داده شد در حالت سکون خواهد بود. در حالی که ترک‌های نسبتاً نزدیک ممکن است ادغام شوند و ترک‌های بزرگ‌تری در سطح آزاد ایجاد کنند. این مکانیسم به شدت به توزیع فضایی ترک‌ها وابسته است. اگرچه هسته‌زایی ترک در این مرحله تا حدی تصادفی است.

مرحله ۲: رشد ترک خوردگی تنشی

انتشار ترک در این مرحله در مقایسه با مرحله ۱ سریع است و یک خط لوله ترک خورده که تایید شده در مرحله ۲ است باید قبل از شروع مرحله ۳ تحت نظارت و تعمیر قرار گیرد. در بخش بعدی شرایط آستانه برای رشد ترک مکانیکی توسط ترک خوردگی تنشی و مکانیسم‌های رشد ترک برای این مرحله مورد بحث قرار گرفته است.

آستانه مرحله ۲ رشد ترک خوردگی تنشی

در پایان مرحله ۱، یک نقص بین دانه‌ای با ابعاد بحرانی برای شرایط بار اعمال شده تشکیل می‌شود. اثرات هم‌افزایی شرایط محیطی، خواص مواد، هندسه نقص و شرایط بارگذاری مقدار آستانه ترک خوردگی را تعیین می‌کند. معنای آستانه این است که رشد ترک پایدار به‌ویژه در جهت ضخامت حاصل می‌شود. پس از آستانه، نرخ رشد ترک به طور قابل توجهی در مقایسه با مراحل قبلی افزایش می‌یابد. چن و همکاران [۲۵] تعیین نمودند برای یک سیستم محیطی معین، شرط آستانه با ترکیب هندسه نقص و شرایط بارگذاری مرتبط است. چندین تعریف آستانه برای ترک خوردگی تنشی وجود دارد که در زیر به آنها اشاره شده است: K_{Isc} : این به عنوان ضریب شدت تنش بحرانی برای SCC شناخته می‌شود و نشان دهنده حداقل ضریب شدت تنش (K_I) در نوک ترک است که می‌تواند باعث ادامه رشد ترک در شرایط بارگذاری استاتیک شود [۲۶].

ΔK_{th} : حداقل ضریب شدت تنش که در آن رفتار رشد ترک تغییر می‌کند، تحت شرایط بارگذاری چرخه‌ای فرکانس پایین متفاوت است. یک بحرانی (ΔK_{th}) وجود دارد که در آن رفتار رشد ترک تغییر می‌کند. بر این اساس، مرحله ۲ ترک خوردگی تنشی می‌تواند با ضریب شدت تنش در ترک خوردگی تنشی در حضور بارگذاری چرخه‌ای شروع شود [۲۶].

نرخ کرنش بحرانی: حداقل نرخ کرنش نوک ترک که شرایط پایدار بدون فیلم را در نوک ترک فراهم می‌کند. نرخ کرنش نوک ترک^۱ می‌تواند با نرخ کرنش لوله متفاوت باشد. شایان ذکر است که هیچ ارتباط مستقیمی بین پارامترهای بارگذاری و نرخ کرنش بحرانی نوک ترک وجود ندارد. از آنجایی که شکاف‌ها از طریق مرزهای دانه منتشر می‌شوند، شرایط ایده‌آل استفاده از آستانه نرخ کرنش بحرانی در مرزهای دانه است. تاکنون نرخ کرنش بحرانی نوک ترک یا نرخ کرنش مرزی دانه آستانه برای ترک خوردگی تنشی هنوز تعریف نشده است [۲۷].

انتشار ترک در مرحله ۲

سه مکانیسم مختلف می‌توانند به طور هم‌زمان در ایجاد پیشرفت ترک در این مرحله نقش داشته باشند. این مکانیسم‌ها به شرح زیر توضیح داده می‌شوند:

(الف) مکانیسم انحلال آندی: مکانیسم رشد ترک اولیه در مرحله ۲، پارگی فیلم و به دنبال آن انحلال آندی است. در این مرحله، نیروی محرکه مکانیکی به اندازه کافی قوی است که فیلم غیرفعال را در نوک ترک پاره کند و شرایطی را فراهم کند که

¹ CTSR: crack tip strain rate



فلز در معرض محیط خورنده قرار گیرد. سلول گالوانیکی متشکل از کاتد (دیوار ترک غیرفعال شده) و آند (فلز فعال در نوک ترک) تشکیل می‌شود و ترک از طریق انحلال آندی موضعی در نوک ترک منتشر می‌شود. انحلال آندی ادامه می‌یابد مگر اینکه در نوک ترک عمل مجدد انجام شود. دو شرط ممکن را می‌توان برای این مکانیسم رشد ترک در نظر گرفت [۲۸ و ۲۹]. شرط اول، قرار گرفتن مداوم نوک ترک در معرض محیط خورنده، که یک شرایط شدید است که در آن تشکیل فیلم در نوک ترک به دلیل شرایط بارگذاری شدید امکان‌پذیر نیست و نوک ترک به طور مداوم در معرض محیط ترک خوردگی تنشی قرار دارد. شرط دوم تشکیل و پارگی مکرر لایه غیرفعال در نوک ترک است. تحت این شرایط، انحلال نوک ترک به فاصله زمانی بین پارگی فیلم و رویدادهای منفعل مجدد بعدی محدود می‌شود. بنابراین، رقابت بین مکانیسم‌های تشکیل فیلم و پارگی فیلم، نرخ رشد ترک را تعیین می‌کند. نرخ کرنش یک پارامتر چند وجهی است که رقابت بین تشکیل فیلم و گسیختگی فیلم را قضاوت می‌کند.

(ب) هسته‌زایی ترک ثانویه و ادغام ترک: مکانیسم ثانویه برای انتشار ترک در این مرحله، هسته‌زایی ترک‌های ثانویه و ادغام با ترک اصلی در سطح آزاد تحت سه شرط بارگذاری می‌باشد [۲۳]. این مکانیسم به شکل موج‌های بارگذاری حساس است و تحت شرایط بارگذاری دامنه متغیر به ویژه آنهایی که دارای چرخه‌های نسبت تنش کم فرکانس بالا هستند، تقویت می‌شود. این نتایج نشان می‌دهد که چرخه‌های با نسبت تنش پایین، هسته‌زایی ترک ثانویه را جلوتر از نوک ترک اصلی تسهیل می‌کنند. بنابراین، ادغام ترک در سطح آزاد افزایش می‌یابد. به طور مشابه، در مرحله IB، افزایش طول سطح ترک باعث افزایش نیروی محرکه مکانیکی در نوک عمق می‌شود. علاوه بر این، ادغام ترک بزرگ در سطح آزاد که می‌تواند رخ دهد، باعث افزایش قابل توجهی در نرخ رشد ترک در نوک سطح آزاد و همچنین نوک عمق می‌شود.

(ج) انتشار ترک خستگی ناشی از خوردگی: وو و همکاران [۳۰] در بررسی دیگر عوامل تاثیر گذار بر روی ترک خوردگی تنشی دریافتند که خستگی مکانیکی ممکن است به انتشار ترک در مرحله ۲ کمک کند. با توجه به قرار گرفتن ماده در معرض محیط خورنده، اصطلاح "خستگی خوردگی" ممکن است برای این مکانیسم مناسب‌تر باشد. با این حال، سهم این مکانیسم همیشه کم است زیرا چرخه‌های بار در فولادها، به ویژه در خطوط لوله، فرکانس بسیار کمی دارند.

مرحله ۳: رشد سریع ترک

مرحله ۳ انتشار ترک خوردگی تنشی کوتاه است و هیچ اهمیت مهندسی ندارد جز اینکه باید از آن اجتناب کرد. خط لوله ترک خورده باید قبل از شروع مرحله ۳ تعمیر یا تعویض شود. در پایان مرحله ۳، انتشار سریع ترک منجر به پارگی یا نشت به ترتیب برای چقرمگی شکست پایین و بالا می‌شود [۳۲ و ۳۲۱].

به محض اینکه شرایط محیطی برای ترک خوردگی تنشی ایجاد شود، ترک‌های کم عمق در چندین نقطه متمرکز می‌شوند (مرحله ۱) و ترک‌های بحرانی مرحله ۲ را تشکیل می‌دهند که باعث رشد پایدار ترک در آن مرحله می‌شود. همانطور که ترک منتشر می‌شود، نیروی محرکه مکانیکی هم در نوک عمق ترک افزایش می‌یابد، یعنی ضریب شدت تنش در مورد بار استاتیکی و تغییرات آن در مورد بارگذاری چرخه‌ای افزایشی است. رشد ترک در مرحله ۱ تصادفی است و ترک‌ها در مرحله انتشار هستند. با این حال، نرخ رشد ترک آنی ممکن است زمانی افزایش یابد که دو ترک مجاور با هم ترکیب شوند و ضرایب شدت تنش را برای هر دو ترک افزایش دهند. صرف نظر از نوع بارگذاری، مرحله ۱ تا حد زیادی طول عمر خط لوله را کنترل می‌کند در حالی که انتشار ترک پایدار بالاتر از مقدار آستانه برای مرحله ۲ رخ می‌دهد. مرحله ۱ در شرایط بارگذاری چرخه‌ای به سه دلیل کوتاه‌تر است. ابتدا، بارگذاری چرخه‌ای به هسته‌زایی ترک کمک می‌کند و پس از آن، احتمال بیشتری برای ادغام ترک در شرایط بارگذاری چرخه‌ای انتظار می‌رود. علاوه بر این، نرخ رشد ترک در شرایط دامنه متغیر نشان می‌دهد که چرخه‌های نسبت تنش پایین، رشد ترک را در مرحله ۱ افزایش می‌دهند. ثانیاً، آستانه برای مرحله ۲ تابعی از شرایط بارگذاری است. آستانه برای مرحله ۲ ترک خوردگی تنشی می‌تواند به عنوان شرایطی تعریف شود که حداکثر ضریب شدت تنش از K_{ISCC} در شرایط بارگذاری ثابت) یا حداکثر ΔK از ΔK_{th} در شرایط بارگذاری چرخه‌ای) فراتر رود. ثالثاً، در شروع مرحله ۲، نرخ انتشار ترک تحت بار استاتیکی (که در آن $K > K_{ISCC}$) در مقایسه با شرایط بارگذاری چرخه‌ای (که $\Delta K > \Delta K_{th}$) بیشتر است. با افزایش زمان، نرخ



انتشار ترک در شرایط بارگذاری چرخه‌ای احتمالاً به دلیل سهم بیشتر خستگی فلز (افزایش کیلومتر و ΔK در معادله قانون پاریس) افزایش می‌یابد. انتشار ترک در این مرحله به طور مستقیم با نرخ کرنش در نوک ترک مرتبط است و می‌توان توسط پارامترهای مکانیک شکست الاستیک خطی مانند ضرایب شدت تنش و تغییرات آن فرموله شود. بنابراین، نرخ رشد ترک با افزایش نیروی محرکه مکانیکی یا ضرایب شدت تنش افزایش می‌یابد. رابطه (۱) یک مدل برهم نهی است که می‌تواند برای رفتار رشد ترک خوردگی تنش استفاده شود.

$$\frac{da}{dt} = \left(\frac{da}{dt}\right)_{stage1} + \left(\frac{da}{dt}\right)_{stage2-SCC} + \frac{1}{f} \left(\frac{da}{dN}\right)_{stage2-CF} \quad (1)$$

در این معادله $\left(\frac{da}{dt}\right)_{stage1}$ نشان دهنده مکانیسم‌های رشد ترک در مرحله ۱ است، $\left(\frac{da}{dt}\right)_{stage2-SCC}$ مخفف ترک ناشی از مکانیسم انحلال آندی است، $\left(\frac{da}{dN}\right)_{stage2-CF}$ سهم خستگی خوردگی در مرحله ۲ می‌باشد.

می‌توان در مرحله ۲، سرعت رشد ترک را با پارامترهای مکانیک شکست مرتبط کرد. با این حال، ارتباط بین پارامترهای بارگذاری و رشد ترک در مرحله ۱ همچنان نامشخص است. سانتوس و همکاران [۳۳ و ۳۴] با مطالعه بر روی آزمون‌های نرخ کرنش آهسته، بار ثابت و رشد ترک خستگی بر روی نمونه‌های فولادی API X70 در محلول اتانول مصنوعی در هوا برای ارزیابی حساسیت به ترک خوردگی تنش و خستگی خوردگی نشان دادند که نرخ کرنش آهسته در نمونه‌های دارای ترک اولیه بیشتر از نمونه‌های بدون ترک اولیه است. همچنین آنها بیان نمودند که برای ارزیابی حساسیت ترک خوردگی تنش جوش‌های محیطی روی خطوط لوله فولادی، می‌تون از طریق آزمایش‌های رشد ترک خستگی و نرخ کرنش آهسته استفاده نمود. مایک و همکاران [۳۵] بر روی انواع حفاظت‌ها بر جلوگیری از ایجاد ترک و رشد خوردگی مطالعاتی انجام دادند که در نهایت، محافظ سطح مناسب به عنوان راه حلی برای مهار خوردگی تناسب با انواع شکست‌ها پیشنهاد گردید. اکسی و همکاران [۳۶] بر روی رفتارهای ترک خوردگی تنش در فولادهای کم آلیاژ در محلول نمک حاوی گوگردی اکسید مطالعاتی را انجام داده و ثابت نمودند که عمدتاً خوردگی حفره‌ای رخ می‌دهد. در واقع هنگامی که غلظت سدیم هیدروژن کربنات به ۰/۰۱ مول در لیتر افزایش می‌یابد، بار استاتیکی موضعی را افزایش می‌دهد که منجر به ایجاد حفره‌ها می‌شود و غلظت تنش در اطراف چاله‌ها منجر به شروع و انتشار ترک می‌شود. ژانگ و همکاران [۳۷] بر روی نقش کلر، شکاف و اثر هم افزایی آنها در ترک خوردگی تنش مطالعاتی را انجام دادند. در این مطالعات نشان دادند که پس از خوردگی شکاف، یک شیار خوردگی عمیق تشکیل می‌شود که بر هسته‌زایی ترک غالب بود و از طرفی جذب هیدروژن در نزدیکی دهانه شکاف بیشتر می‌شود. از طرفی دیگر کلر باعث افزایش خوردگی شکاف می‌شود که با افزایش عمق شیار و محتوای جذب هیدروژن حساسیت ترک خوردگی تنش افزایش می‌شود. چاندولا و همکاران [۳۸ و ۳۹] در مطالعات خود به ساخت یک مدل و روش بهینه برای پیش‌بینی نرخ انتشار ترک تحت تأثیر نمک متمرکز شدند. آنها پیش‌بینی نرخ انتشار ترک به عنوان متغیر ویژگی همراه با طول ترک و شدت تنش را ارائه نمودند.

نتیجه‌گیری

اگرچه تحقیقات قابل توجهی در رابطه با ترک خوردگی تنش در فولادهای مختلف انجام شده است، اما برخی از جنبه‌های این پدیده ناشناخته یا ناقص باقی مانده‌اند.

- تحقیقات تجربی برای تأیید و بهبود نتایج مدل‌سازی رشد ترک خوردگی تنش مورد نیاز است. تعداد مقالات موجود که مسیر رشد ترک را به خصوصیات مرزی دانه در مورد خطوط لوله فولادی مرتبط می‌کند، محدود است. پیشنهاد می‌گردد تحقیقات تجربی بیشتر برای صحت‌گذاری بر نتایج حاصل از مدل‌سازی‌های رشد ترک خوردگی تنش بر روی لوله‌ها و ورق‌ها انجام گردد.

- مکانیسم‌های شروع ترک باید روشن شوند. به طور خاص، مقدار آستانه برای شروع ترک خوردگی تنش از طریق بارگذاری چرخه‌ای با دامنه ثابت یا شرایط بارگذاری استاتیکی برای فولادها تعیین شود. شرایط بارگذاری دامنه متغیر ممکن



است آستانه شروع ترک خوردگی تنش را تغییر دهد. بررسی این که چرا ترک‌ها کند می‌شوند و تحت چه شرایطی رشد آنها ادامه می‌یابد.

- شرایطی که می‌تواند باعث تاخیر در حالت انتشار ترک در مرحله ۲ و افزایش طول عمر شود. تا به امروز، برای مدل‌سازی ترک خوردگی تنش به مرحله ۲ توجه بیشتری شده است. ارتباط بین مکانیسم‌های رشد ترک در مرحله ۱ و شرایط بارگذاری مکانیکی نامشخص باقی مانده است

مراجع

- [1] Song, F., (2015), Predicting the Effect of Soil Seasonal Change on Stress Corrosion Cracking Susceptibility of Buried Pipelines At High Ph, Corrosion, 66(9), pp 095004-095004.
- [2] Shipilov, S.A., Le, I., (2006), Structural integrity of aging buried pipelines having cathodic protection, Engineering Failure Analysis, 13(7), pp 1159-1176.
- [3] Sutherby, R., Chen, W., (2004), Deflected Stress Corrosion Cracks in the Pipeline Steel, Proceedings of the 2004 International Pipeline Conference 1(2), pp 113-121.
- [4] Cerny, I., Mikulova, D., Novak, P., (2010), Conditions of Stress Corrosion Crack Growth and Retardation in X70 Steel in Carbonate Environments, Communications-Scientific letters of the University of Zilina, 12(4), pp 68-72.
- [5] Norsworthy, R., (2009), Coatings Used In Conjunction With Cathodic Protection Shielding Vs Non-Shielding Pipeline Coatings, In Corrosion, 22-26 March, Atlanta, Georgia.
- [6] Jack, T.R., Krist, K., Erno, B., Fessler, R.R., (2000), Generation of Near Neutral pH and High pH SCC Environments on Buried Pipelines, In Corrosion 29-31 March, Orlando, Florida.
- [7] Zadow, L.J., (2014), Characterisation of the morphology of inclined SCC cracks in Australian.
- [8] Parkins, R.N., (1990), Strain Rate Effects in SCC, Corrosion. 46, pp 178-189.
- [9] Niazi, H., Chevil, K., Gamboa, E., Lamborn, L., Chen, W., Zhang, H., (2020), Effects of Loading Spectra on High pH Crack Growth Behavior of X65 Pipeline Steel. Corrosion, 76(6), pp 601-615.
- [10] Parkins, R.N., (2000), A Review of Stress Corrosion Cracking of High Pressure Gas Pipelines, Corrosion, 23, pp 170-184.
- [11] Beavers, J. a., Harle, B. a., (2001), Mechanisms of High-pH and Near-Neutral-pH SCC of Underground Pipelines, Journal of offshore mechanics and arctic engineering, 123(3), pp 147-151.
- [12] Beavers, J.A., (2014), Integrity management of natural gas and petroleum pipelines subject to stress corrosion cracking, Corrosion, 70, pp 3-18.
- [13] Zhao, W. Zou, Y ., Xia, DX., Zou, ZD., (2015), Effects Of Anodic Protection On SCC Behavior Of X80 Pipeline Steel In High-pH Carbonate-Bicarbonate Solution, Archives of Metallurgy and Materials, 60(2A), pp 1009-1013.
- [14] Longfei, S. , Zhiyong, L., Xiaogang, L.i., Cuiwei, D.u., (2020), Stress Corrosion Cracking of Simulated Weld Heat-Affected Zone on X100 Pipeline Steel in Carbonate/ Bicarbonate Solution, Journal of Materials Engineering and Performance, 29, pp 2574-2585.
- [15] Zhu, M., Ou, G., Jin, H., Du, C., Li, X., Liu, Z., (2016), Influence of AC waveforms on stress corrosion cracking behaviour of pipeline steel in high pH solution, Corrosion, 51(1), pp 18-24.
- [16] Zhu, M., Du, C., Li, X., Liu, Z., Wang, S., Li, J., Zhang, D., (2014), Effect of AC current density on stress corrosion cracking behavior of X80 pipeline steel in high pH carbonate bicarbonate solution Electrochimica Acta, 117, pp 351-359.
- [17] Been, J., King, F., Fenyvesi, L., Sutherby, R., (2004), A Modeling Approach to High pH Environmentally Assisted Cracking, In International Pipeline Conference, 41766, pp 83-100.
- [18] Roccisano, A., Nafisi, S., Ghomashchi, R., (2020), Stress Corrosion Cracking Observed in Ex-service Gas Pipelines, A Comprehensive Study, Metall and Mat Trans., 51(1), pp 167-188.
- [19] Fessler, M.H.R.R., Batte, A.D., (2008), Integrity management of stress corrosion cracking in gas pipeline high consequence areas. ASME Standards Technology, LLC.
- [20] Pourazizi, R., Mohtadi-Bonab, M.A., Szpunar, J.A., (2020), Investigation of different failure modes in oil and natural gas pipeline steels, Engineering Failure Analysis, 109, pp 104400.



- [21] Kentish, P., (2007), Stress corrosion cracking of gas pipelines – Effect of surface roughness, orientations and flattening, *Corrosion*, 49(6), pp 2521–2533.
- [22] Niazi, H., Zhang, H., Lamborn, L., Chen, W., (2020), The impact of pressure fluctuations on the early onset of stage II growth of high pH stress corrosion Crack. *ASME*, 1, pp v01t03a022.
- [23] Chen, W. (2017), Modeling and prediction of stress corrosion cracking of pipeline steels. *Trends in oil and gas corrosion research and technologies*, pp 707-748.
- [24] Wang, S., Lamborn, L., Chen, W., (2022), Stress corrosion crack initiation and propagation before proceeding to Stage 2 for hydrostatically tested pipeline steels. *Journal of Materials Science*, 57(33), pp 15967-15989.
- [25] Chen, W., Zhao, J., Chevil, K., Gamboa, E., (2018), Threshold Geometrical Dimensions of Stage II Cracks Versus Required Resolution of Crack-Detection Techniques, In *International Pipeline Conference*, American Society of Mechanical Engineers 51869, p. V001T03A057.
- [26] Parkins, R.N., Greenwell, B.S., (1977), The interface between corrosion fatigue and stress-corrosion cracking, *Metal Science*, 11(8–9), pp 405–413.
- [27] Griggs, J., Gamboa, E., Lavigne, O., (2016), A review of modelling high pH stress corrosion cracking of high pressure gas pipelines. *Corrosion*, 67(3), pp 251–263.
- [28] Niazi, H., Zhang, H., Korol, K., (2018), High pH crack growth sensitivity to underload-type of pressure fluctuations. In *International Pipeline Conference*, 51869, pp v001t03a064.
- [29] Shuai, Y., Wang, X. H., Feng, C., Zhu, Y., Wang, C. L., Sun, T., (2021), A novel strain-based assessment method of compressive buckling of X80 corroded pipelines subjected to bending moment load. *Thin-Walled Structures*, 167, pp 108172.
- [30] Wu, W., Hao, W., Liu, Z., Li, X., (2020), Comparative study of the stress corrosion behavior of a multiuse bainite steel in the simulated tropical marine atmosphere and seawater environments. *Construction and Building Materials*, 239, p. 117903.
- [31] Prosgolitis, C. G., Kermanidis, A. T., Kamoutsis, H., (2021), Influence of plastic prestraining on the fatigue crack propagation rate of S355MC and S460MC structural steels. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 44(5), pp 1391-1405.
- [32] Zhang, J., Wang, B., Tian, Y., (2022), Study of pre-strain before artificial aging on mechanical property and stress corrosion behavior of 2297 Al–Cu–Li alloy. *Materials Science and Engineering*, 831, pp 142-174.
- [33] Santos, E. A., Giorgetti, V., Júnior, C. A. D. S., Marcomini, J. B., Sordi, V. L., (2022), Stress corrosion cracking and corrosion fatigue analysis of API X70 steel exposed to a circulating ethanol environment. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 200, pp 104846.
- [34] Santos, E. A., Giorgetti, V., Marcomini, J. B., Monteiro, M. R., Kliauga, A. M., Sordi, V. L., & Rovere, C. A., (2022), Methodology to evaluate stress corrosion cracking in ethanol environments. applied to circumferential welds on API 5 L steel pipelines, *MethodsX*, 9, pp 101675.
- [35] Michel, S., Tuchschild, M., Sauder, M., Frey, S., (2022), Stress Corrosion Cracking of Tunnel Ventilation Fan Blades. *A Case Study Metals*, 12(12), pp 2065.
- [36] Xin, Y., Song, K., Li, Y., Fan, E., Lv, X., (2022), Environmentally assisted stress corrosion cracking behaviour of low alloy steel in SO₂-containing NaCl solution. *Journal of Materials Research and Technology*.
- [37] Zhang, X., Wang, S., Wang, X., Cui, Z., Cui, H., Li, Y., (2023), The stress corrosion cracking behavior of N80 carbon steel under a crevice in an acidic solution containing different concentrations of NaCl. *Corrosion Science*, 216, pp 111068.
- [38] Chandola, N., Maharishi, S., Tewari, V. K., Shukla, A., (2023), Prediction of Crack Propagation Rate Due to Stress Corrosion Cracking in AISI 4340 Steel in 0–5 N NaCl Solution Using Artificial Neural Network. In *Emerging Trends in Mechanical and Industrial Engineering: Select Proceedings of ICETMIE 2022*, pp 543-551.
- [39] Li, Q., Yao, Q., Sun, L., Ma, H., Zhang, C., Wang, N., (2023), Effect of micro-galvanic corrosion on corrosion fatigue cracking of the weld joint of high strength bridge steel. *International Journal of Fatigue*, 170, pp 107568.