

(مقاله مروری)

**بررسی مکانیسم آغاز ترک و مقادیر حدی شکست خستگی در سازه‌های دریایی**امین مسلمی پطرودی<sup>۱</sup>، محمدعلی مسلمی پطرودی<sup>۲</sup>

amin.moslemi2020@gmail.com

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران

۲- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه امیرکبیر، تهران

**چکیده**

با پیشرفت صنعت و افزایش تعداد وسایلی از قبیل خودرو، هواپیما، کشتی، کمپرسور، پمپ، توربین و غیره که تحت بارگذاری تکراری و ارتعاشی هستند، خستگی بیشتر متداول شده و اکنون چنین برداشتی می‌شود که عامل حداقل ۹۰ درصد شکست‌های ناشی از دلایل مکانیکی حین کار خستگی باشد. عموماً شکست سازه‌ای در تنش‌های خیلی کمتر از مقاومت نهایی مواد اتفاق می‌افتد که نمونه‌هایی از آن شامل پل‌ها، مخازن، لوله‌ها، کشتی‌ها، راه‌آهن و سازه‌های هوا فضا می‌باشند. شکست ترد بدون وقوع تغییر شکل محسوس و توسط انتشار ترک سریع بروز می‌کند. جهت حرکت تقریباً عمود بر جهت تنش کششی اعمالی است و یک سطح شکست نسبتاً تخت را نتیجه می‌دهد. سطوح شکست موادی که در حالت ترد شکسته‌اند دارای الگوهای متمایز مربوط به خود می‌باشند. خستگی بطور معمول همراه با جوانه‌زنی ترک در سطح قطعه یا نواحی تمرکز تنش و انتشار آن در ناحیه تحت تنش بیشینه است. کاربرد روش مکانیک شکست برای مواد شکننده یا اعمال ضریب اطمینانی مناسب و در نظر گرفتن کمترین تغییر شکل مجاز میسر می‌باشد. در روش طراحی با استفاده از مکانیک شکست، سه عامل تنش اعمال شده، ابعاد ترک (هرچند کوچک) و چقرمگی از معیارهای طراحی بشمار می‌آیند. در این مقاله، ترک‌های ناشی از خستگی و مکانیزم تشکیل ترک‌های خستگی در سازه‌های دریایی مورد بررسی قرار گرفته است.

**واژگان کلیدی:** شکست خستگی، ترک، سازه دریایی، ناپایداری، شکست ناپایدار.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۰۴/۰۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۰۹/۱۱

## مقدمه

توزیع ضریب شدت تنش در پیشانی ترک متقارن است و ترک در صفحه اولیه خود رشد می‌کند که نشان دهنده غالب بودن رفتار مُود اول شکست در طول رشد ترک است. در تمامی نمونه‌ها، ترک بعد از چند مرحله رشد به شکل نیم‌بیضی در می‌آید و این حالت را تا لحظه شکست حفظ می‌کند. در سال ۱۳۹۵ مامندی و همکاران [۵] به تحلیل مکانیک شکست و تخمین عمر رشد ترک خستگی پره توربین گاز با استفاده از روش المان محدود پرداخته‌اند که از نتایج این تحلیل، مناطق دارای تنش بالا و مستعد رشد ترک در پره شناسایی می‌گردند. سپس با مدل‌سازی ترک در این نواحی، عمر رشد ترک خستگی تخمین زده می‌شود. برای این منظور، ابتدا در نرم‌افزار انسیس برای ترک‌هایی با ابعاد مختلف مقدار ضرایب شدت تنش محاسبه می‌شود. سپس با استفاده از این مقادیر و نیز نمودار نرخ رشد ترک برحسب ضریب شدت تنش ماده، نرخ رشد ترک سیکلی برای ترک‌هایی با نسبت ابعاد مختلف ( $a/c$ ) محاسبه می‌گردد. در انتها با انتگرال‌گیری عددی، تعداد سیکل خستگی تا رسیدن به عمق ترک بحرانی برای پره توربین محاسبه می‌گردد. در سال ۱۳۹۵ نیک مهر و همکاران [۶] به تخمین نرخ رشد ترک خستگی با فاصله موج‌ها در سطح شکست آلیاژ آلومینیم ۲۰۲۴ پرداخته‌اند که با استفاده از داده‌های تجربی موجود در سطوح تنشی مختلف و نسبت‌های تنشی متفاوت، رابطه بین نرخ رشد ترک خستگی و ضریب شدت تنش (رابطه پاریس)، با اضافه کردن یک ضریب هندسی، اصلاح شده و نرخ رشد ترک برابر با ضریبی از فاصله موج‌ها تعیین شده است. در ادامه، با واحد در نظر گرفتن ضریب هندسی فوق، رابطه پاریس، با استفاده از فاصله موج‌ها در سطح شکست ماده، مجدداً اصلاح شده و ثوابت مادی استخراج شده است. در سال ۱۳۹۶ امیریان و همکاران [۷] به مقایسه نظریه‌های مختلف پیش‌بینی شکست خستگی نمونه‌های فاق‌دار فولاد CK45 پرداخته‌اند که نتایج این نظریه‌ها با نتایج آزمایش مقایسه شده است. مقایسه نتایج نظری و آزمایشگاهی نشان داده که نظریه ضعیف‌ترین اتصال نسبت به نظریه‌های کلاسیک از دقت بهتری برخوردار است. در سال ۱۳۹۶ معتمدی و همکاران [۸] به مقایسه مقاومت خستگی و انرژی

خستگی بطور معمول همراه با جوانه‌زنی ترک در سطح قطعه یا نواحی تمرکز تنش و انتشار آن در ناحیه تحت تنش بیشینه است. به شکست ماده در اثر اعمال نیروهای متناوب کمتر از استحکام نهایی و اغلب کمتر از حد تسلیم، خستگی گفته می‌شود. خستگی مواد وقتی اتفاق می‌افتد که ماده تحت تنش‌های تکراری یا نوسانی قرار گیرد که منجر به شکست ناگهانی قطعه می‌گردد. خستگی بیشتر متداول شده و اکنون چنین برداشت می‌شود که عامل حداقل ۹۰ درصد شکست‌های ناشی از دلایل مکانیکی حین کار خستگی باشد [۱۳]. دلیل اصلی خطرناک بودن شکست خستگی این است که بدون آگاهی قبلی و قابل رویت بودن اتفاق می‌افتد. خستگی علت شکست زود هنگام بیشتر قطعه‌های صنعتی است [۱]. شکست‌های که در شرایط بارگذاری دینامیک رخ می‌دهند شکست‌های خستگی نامیده می‌شوند؛ که این نامگذاری احتمالاً مبتنی بر این دلیل است که به‌طور کلی مشاهده می‌شود شکست‌ها فقط پس از یک دوره کار زیاد رخ می‌دهند. در سال ۱۳۹۰، آیت‌اللهی و همکاران [۳] به بررسی خستگی پرچرخه پرداخته‌اند که اثر تنش میانگین با استفاده از نمودار هیگ مورد توجه قرار گرفته است. نتایج بدست آمده از آن‌ها با یکدیگر مقایسه شده است. تقریباً تمام قطعات موتور تحت بارگذاری چند محوری قرار دارند که این بارگذاری‌ها می‌توانند به صورت تناسبی و یا غیرتناسبی باشند. در بارگذاری غیر تناسبی یک سخت‌شوندگی چرخه‌ای اضافی در ماده اتفاق می‌افتد. نظریه‌های خستگی کم‌چرخه مبتنی بر دیدگاه صفحه بحرانی، برای در نظر گرفتن اثرات این سخت‌شوندگی چرخه‌ای اضافی بر کاهش عمر قطعه مناسب هستند. هم‌چنین اثر خستگی پرچرخه بر خستگی کم‌چرخه نیز مطالعه شده است. در نهایت از روند ارزیابی عمر ارائه شده برای بدست آوردن عمر خستگی حرارتی مکانیکی سمبه یک موتور دیزل سنگین استفاده شده است. در سال ۱۳۹۵ سیفی و همکاران [۴] به بررسی رشد ترک خستگی ناشی از خمش در استوانه‌های اتوفرتاژ شده با ترک خارجی پرداخته‌اند که از بررسی نتایج مشاهده گردید که در اتوفرتاژ ۶۰٪ تعداد سیکل‌های شکست کمتر از اتوفرتاژ ۴۰٪ و آن نیز کمتر از حالت بدون اتوفرتاژ است.

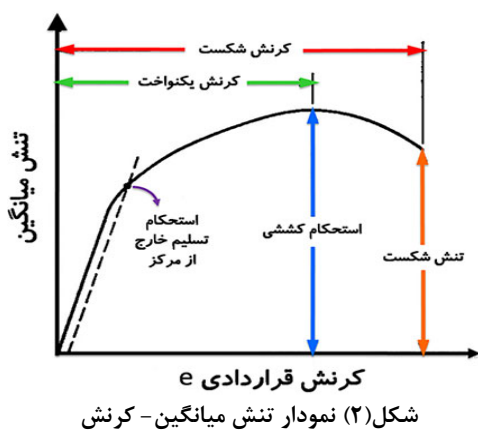
مشکلات ارتعاشی و حوادث شکست خستگی مکانیکی پرداخته‌اند که در این بررسی ماتریس جابجایی المان‌های سطحی پره حاصل از آنالیز مودال در نرم افزار انسیس فراخوانی می‌شود و با استفاده از قابلیت تغییرشکل المان‌های سیال تحلیل فلاتر و محاسبه میرایی انجام می‌گردد. این تحلیل در یک گستره از گره‌های قطری صورت گرفت که به ازای دومین گره قطری، کمترین میزان میرایی معادل  $0.0002$  بدست آمد بطوریکه بیانگر شرایط با پایداری حداقل جریان در بین پره‌های روتاری ردیف اول برای وقوع فلاتر و ایجاد ارتعاشات ناخواسته پره می‌باشد. خستگی به صورت شکستی با ظاهر ترد، بدون هیچ‌گونه تغییر شکل ناخالص در شکست نتیجه می‌شود [۲]. سه عامل عمده برای وقوع شکست خستگی ضروری بوده عبارتند از: (۱) تنش کششی حداکثری به مقدار بسیار زیاد (۲) تغییرات به حد کافی زیاد یا نوسانی در تنش وارده (۳) زیاد بودن چرخه‌های تنش وارده. علاوه بر این متغیرهای دیگری مانند تمرکز تنش، خوردگی، دما، بار اضافی، ساختار متالورژیکی، تنش‌های باقیمانده و تنش‌های مرکب هم وجود دارند که شرایط را برای ایجاد خستگی تقویت می‌کنند [۱۳]. شکل ۱ مقایسه معیارهای مختلف خستگی را نشان می‌دهد. یک روش تخمین عمر خستگی شامل استفاده از رفتار نمودار S-N و نمودارهای بهینه‌شده گودمن<sup>۱</sup> برای تنش متوسط می‌باشد. روش دیگر استفاده از نمودار  $\epsilon-N$  با استفاده از مدل‌های آنالیز کرنش شکاف و مدل‌های برای تنش‌های متوسط می‌باشد. روش سوم انتگرال  $da/dN - \Delta K$  (نرخ رشد ترک خستگی بر حسب شدت تنش) با والکر و فورمن<sup>۲</sup> یا مدل‌های دیگر برای تنش متوسط می‌باشد. در روش انتگرال دو مرحله‌ای استفاده شده از نمودار  $da/dN - \Delta K$  تا اینکه هم هسته ترک هسته‌ای و هم رشد ترک خستگی را شامل شود. مقادیر بدست آمده از نمودار S-N از تست‌های خستگی قطعات جوش بصورت افقی بوده و از معمول‌ترین

شکست مخلوط‌های آسفالتی حاوی اصلاح‌کننده‌های ساسوبیت و پارافایبر پرداخته‌اند که آنالیزهای اقتصادی نشان داد استفاده از افزودنی پارافایبر باعث می‌گردد تا عملکرد-هزینه آسفالت از دیدگاه خستگی و انرژی شکست نسبت به طرح اختلاط آسفالت معمولی تا ۲ برابر بهبود پیدا کند. در سال ۱۳۹۷ اسدی و همکاران [۹] به شبیه‌سازی شکست خستگی در شاسی دستگاه ماریچج انتقال مواد فله پرداخته‌اند که نتایج تحلیل عددی و شبیه‌سازی با آنچه که در واقعیت برای این دستگاه اتفاق افتاده مقایسه شده است. حاصل این ارزیابی بدین صورت شد که شبیه‌سازی شاسی و استفاده از معیارهای تنش پایه عمر شاسی حدود ۸ سال محاسبه شد که با انجام اصلاحاتی اعم از ایجاد استیفرنر در نقاطی خاص از شاسی عمر این سازه به ۱۱ سال ارتقاء پیدا کرد. در سال ۱۳۹۷ سمیعی و همکاران [۱۰] به تخمین عمر خستگی کمپرخه آلیاژ آلومینیوم-سیلیسیوم-منیزیم سرسیلندر موتور براساس آثار موجی شکل در سطح شکست و رابطه رشد ترک پاریس پرداخته‌اند که نتایج تخمین عمر نسبت به عمر تجربی نشان داد که محدوده پراکندگی در بازه  $0.2 \times 5$  قرار گرفت که نشان دهنده دقت مناسب مدل ارایه شده براساس فاصله بین موج‌های موجود در سطح شکست ماده می‌باشد. در سال ۱۳۹۸ رحمانی و همکاران [۱۱] به تحلیل شکست ناشی از خستگی-خوردگی پره‌های کمپرسور توربین گازی پرداخته‌اند که بررسی‌ها نشان می‌دهد که حفره‌های خوردگی ایجاد شده بر روی سطح پره کمپرسور ناشی از وجود عناصر CL و S در هوای ورودی کمپرسور بوده است. از آنجا که نیروگاه در مجاورت شرکت سیمان و شرکت پالایش نفت قرار دارد هوای ورودی کمپرسور حاوی مقدار زیادی از ترکیبات CL و S بوده است. وجود حفره‌های ناشی از خستگی و خوردگی به عنوان مکان‌های تمرکز تنش برای ایجاد ترک عمل کرده است. مشاهده می‌گردد که این امر باعث شده که شروع و رشد ترک زودتر انجام شده و زمینه شکست نهایی پره‌ها مهیا شود. در سال ۱۳۹۸ محمدی و همکاران [۱۲] به آنالیز فلاتر پره روتاری مرحله اول کمپرسور یک مدل توربین گاز با وجود

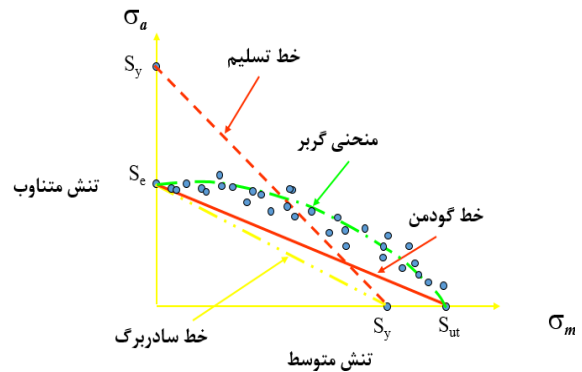
1 Goodman

2 Walker and forman

به صورت نمودار تنش- کرنش رسم می‌شود. چون هم تنش و هم کرنش از تقسیم بار و ازدیاد طول بر عوامل ثابتی بدست می‌آیند، منحنی بار ازدیاد طول نیز شکلی مانند منحنی تنش- کرنش مهندسی دارد. هر دو منحنی معمولاً به جای هم مورد استفاده قرار می‌گیرند. شکل و مقدار منحنی تنش- کرنش یک فلز به ترکیب شیمیایی، عملیات حرارتی، تاریخچه قبلی تغییر شکل پلاستیک (مومسان) و آهنگ کرنش، دما و حالت تنش وارده هنگام آزمایش بستگی دارد. استحکام کششی، استحکام تسلیم، درصد ازدیاد طول و کاهش سطح مقطع پارامترهایی هستند که در تشریح منحنی تنش- کرنش هر فلز بکار می‌روند. دو پارامتر اول معرف استحکام و دو تای بعدی معرف داکتیلیته (شکل پذیری) هستند. در ناحیه الاستیک منحنی تنش- کرنش مهندسی، تنش با کرنش رابطه خطی دارد. موقعی که مقدار تنش از استحکام تسلیم جسم بیشتر شود، نمونه تغییرشکل پلاستیک را تحمل می‌کند. پس از آن نیروی لازم برای ادامه تغییرشکل افزایش می‌یابد ولی این افزایش به صورت خطی نیست. اگر نیرو بعد از تغییر شکل پلاستیک به صفر کاهش پیدا کند مقداری تغییر شکل دائمی در نمونه باقی خواهد ماند. نیرو یا تنش لازم برای ادامه تغییرشکل پلاستیک با افزایش کرنش پلاستیک زیاد می‌شود و به عبارت دیگر جسم کار سخت می‌شود. حجم نمونه یا حاصل ضرب طول در سطح، در حین تغییر شکل پلاستیک ثابت باقی می‌ماند، یعنی:  $AL=A_0L_0$



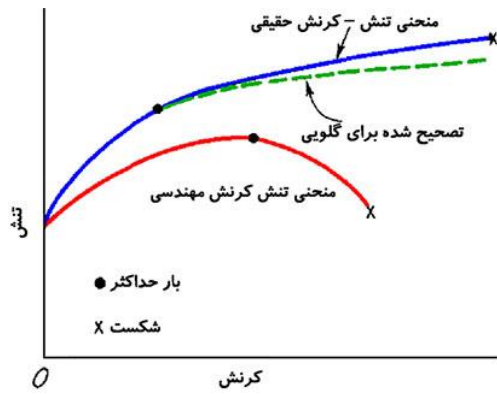
روش‌های طراحی خستگی قطعات جوش می‌باشد. با توجه به آنکه اغلب قطعات دارای سطوح پرداخت خوبی نیستند، لذا برای خستگی پیچشی نیز از معیارهای گودمن، گریر و بیضی ASME استفاده می‌شود.



شکل (۱) مقایسه معیارهای مختلف خستگی [۳۲].

### مکانیک شکست

در اکثر قطعات بعلت وجود عیوب و حفره‌ها و ترک‌های ریز در ساختار کریستالی‌شان شکست در تنش‌هایی کمتر از مقاومت نهایی ماده صورت می‌گیرد، تمرکز تنش زمانی رخ می‌دهد که بی‌نظمی‌هایی در شکل هندسی یا مواد عنصر ساختاری وجود داشته باشد، که سبب اختلال در جریان تنش می‌گردد. عدم یکپارچگی هندسی سبب می‌شود تا جسم افزایش موضعی تنش را برداشته باشد. عدم یکپارچگی ماده، نظیر ناخالصی‌های فلزات، ممکن است تنش را متمرکز سازد. ناخالصی در سطح یک عنصر ممکن است از ایجاد تناسب و انطباق در طی ساخت محصول ایجاد اختلال نماید، که سبب ترک‌های مویی می‌شود، ترک‌هایی که در زمان سیکل‌های بارگذاری رشد می‌کنند [۱۴]. شکل ۲ نمودار تنش میانگین- کرنش را نشان می‌دهد. منحنی تنش - کرنش مهندسی از تست کشش بدست می‌آید. با آزمایش کشش یک فلز نرم می‌توان داده‌هایی اساسی درباره خواص مکانیکی آن بدست آورد. در این آزمایش یک نمونه با طرح ویژه در جهت محوری تحت بارگذاری قرار می‌گیرد و در اثر افزایش این نیرو می‌شکند. در حین آزمایش مقدار افزایش طول در فواصل متناوب اندازه‌گیری شده و تنش و کرنش میانگین طبق معادلات بدست می‌آیند. داده‌های بدست آمده از آزمایش کشش



شکل (۳) نمودار تنش - کرنش حقیقی

### شکست ترد و شکست نرم

شکست ترد انتشار بسیار سریع ترک بدون تغییر شکل پلاستیک بوده و توصیف کننده شکست ناپایدار و در تنشی کمتر از حد تسلیم ماده صورت می‌گیرد و غالباً در درجه حرارت‌های پایین اتفاق افتاده و توسط تنش‌های کششی کنترل می‌شود، برای شروع شکست ترد لزوماً نیاز به بارگذاری خستگی و وجود ترک خستگی نیست و تحت بارهای استاتیکی نیز شکست می‌تواند اتفاق بیفتد و لازم بذکر است که وجود تنش‌های پسماند مخصوصاً در قطعات جوشکاری شده شرایط را برای شکست ترد فراهم می‌سازند. عموماً شکست ترد بر اساس ضرایب شدت تنش و شکست نرم بر اساس J انتگرال محاسبه می‌شود [۱۶، ۱۷]. ترک خستگی به صورت بین دانه‌ها پدید می‌آید انتشار آن در بین دانه‌ها بیشتر از مرز دانه‌هاست. به همان اندازه که ترک انتشار می‌یابد تنش‌های پسماند افزایش می‌یابد. بطوریکه یک تقابل افزایشی در نرخ انتشار ترک وجود دارد که شکل ۴ ترک‌های ناشی از خستگی را نشان می‌دهد. اگر فلز جوش و ناحیه متأثر از حرارت (HAZ) ترد و سخت باشد احتمال بروز ترک در اتصال بعد از سرد شدن فلز جوش به مراتب بالا می‌رود. ترک‌های کششی به مراتب متداول‌ترند. آنها می‌توانند هم در فلز جوش و هم در فلز پایه اتفاق بیفتند. ترک‌های برشی غالباً در یک زاویه نسبت به ترک‌های کششی اتفاق می‌افتند. همچنین ممکن است در یک خط در جهت زاویه تنش وارده بر قطعه ادامه پیدا کنند. بیشتر مواقع ترک‌ها بعد از شروع

مکانیک شکست اساساً برای تحلیل اجسام ترک خورده که شکست آنی و بصورت ناپایدار در آنها رخ می‌دهد بوجود آمده است. این روش برای بررسی شکست در حالت الاستیک کامل یا وجود مقداری تغییر شکل پلاستیک در اطراف نوک ترک بکار می‌رود و در حالت کلی مکانیک شکست برای ارزیابی کمیتی ضریب اطمینان سازه در برابر شکست ترد، شرایط لازم برای شروع و انتشار و توقف ترک و طول عمر قطعه ترکدار بکار برده می‌شود [۱۵]. شکل ۳ نمودار تنش - کرنش حقیقی را نشان می‌دهد. تنش حقیقی بطور پیوسته تا ایجاد شکست زیاد می‌شود؛ زیرا تنش حقیقی بر حسب سطح مقطع واقعی نمونه محاسبه می‌شود. در این منحنی، مقدار کرنش نیز بر حسب مقادیر لحظه‌ای محاسبه می‌شود و منحنی جریان نیز موسوم است، چون مشخصه‌های جریان پلاستیک ماده را نشان می‌دهد. هر نقطه واقع بر منحنی جریان می‌تواند تنش تسلیم فلزی که در اثر کشش به مقدار نشان داده شده روی منحنی کرنش کرده باشد، در نظر گرفته شود، بنابراین، اگر بار در این نقطه برداشته و مجدداً اعمال شود، ماده در تمام دامنه بارگذاری مجدد رفتار الاستیک خواهد داشت. در شکل ۳ منحنی تنش حقیقی - کرنش حقیقی با منحنی مشابه آن منحنی تنش - کرنش مهندسی مقایسه شده است. توجه شود که به علت زیاد بودن نسبی کرنش‌های پلاستیک، ناحیه الاستیک در محور  $\sigma$  فشرده شده است. طبق معادلات موجود مابین تنش و کرنش مهندسی با تنش و کرنش حقیقی، منحنی تنش حقیقی - کرنش حقیقی همیشه تا رسیدن به بار حداکثر در سمت چپ منحنی مهندسی قرار دارد. اغلب منحنی جریان از مکان بار حداکثر تا شکست خطی است، در حالی که در سایر موارد شیب آن تا ایجاد شکست بطور پیوسته کم می‌شود. تشکیل ناحیه گلویی یا شیار نرم باعث ایجاد تنش‌های سه بعدی می‌شود که تعیین دقیق تنش کششی طولی را تا وقوع شکست را مشکل می‌سازد.

از شروع تا آزاد شدن کامل تنش موجود در قطعه به رشد خود ادامه می‌دهند. [۱۹].

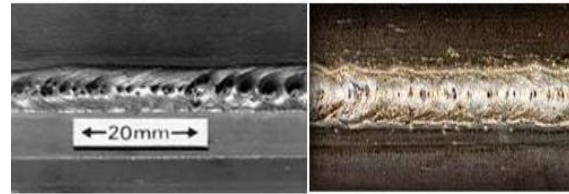
تا آزاد شدن کامل تنش موجود در قطعه به رشد خود ادامه می‌دهند.

### انواع ترک در اتصالات جوشی

ترک‌ها از جمله مهم‌ترین عیوب در اتصالات جوشی بوده و بر اساس تجربیات، وجود آنها می‌تواند تاثیرات جدی بر عملکرد ساختار جوشی حین خدمت داشته باشد. بنابراین حساسیت فراوانی در خصوص عدم وجود ترک در اتصالات جوشکاری شده وجود دارد، به ویژه آنهایی که تحت تاثیر خستگی حاصل از بارگذاری‌های دوره‌ای قرار دارند. ترک‌ها با توجه به درجه حرارتی که در آن به وجود می‌آیند به دو گروه ترک‌های گرم و ترک‌های سرد تقسیم می‌شوند.

### ترک گرم

به‌طور معمول در فلز جوش و البته گاهی نیز در ناحیه متأثر از حرارت تشکیل می‌شود که مکانیزم تشکیل و علت اصلی تشکیل ترک گرم ترکیبات شیمیایی فلز جوش می‌باشد که باعث شده دمای انجماد به جای یک نقطه خاص یک محدوده دمایی باشد. و هرچایی که ناخالصی بیشتر باشد دمای انجماد پایین است و این ناخالصی‌ها اغلب به طرف آخرین نقطه‌ای که در حال انجماد است حرکت می‌کنند [۲۰]. از آنجایی که مرز دانه‌ها آخرین نقطه‌ای است که منجمد می‌شود در نتیجه این ناخالصی‌ها نیز در مرز دانه‌ها جمع می‌شوند. هنگام سرد شدن جوش دانه‌ها نسبت به مرز دانه‌ها زودتر منجمد می‌شوند و در حالی که مرز دانه‌ها هنوز به حالت مذاب هستند دانه‌ها در یک شبکه شناور می‌شوند و نیروهایی که در این هنگام به جوش وارد می‌شود باعث حرکت دانه‌ها در یک محیط تقریباً سیال می‌شود. وقتی دما پایین‌تر می‌آید مرز دانه‌ها نیز کم کم منجمد می‌شوند. مادامی که انجماد کامل نشده است تنش‌های انقباضی ناشی از سرد شدن به فلز جوش نیروی کششی وارد کرده مرز دانه‌ها با توجه به اینکه به طور کامل منجمد نشده‌اند مقاومت خود را در برابر این نیروها از دست داده و دچار پارگی می‌شوند. اگر انعطاف‌پذیری مرز دانه‌ها در مقابل این نیروها مقاومت کند جوش این



شکل (۴) ترک‌های ناشی از خستگی

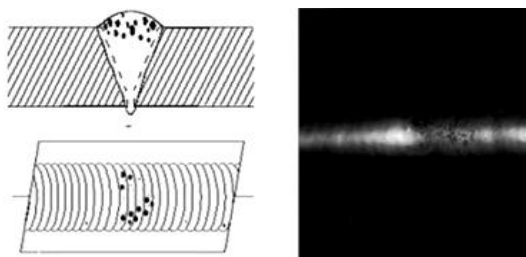
در میان عیوب جوش ترک خطرناک‌ترین آنهاست چون قابلیت جوشکاری و جوش‌پذیری مواد بر پایه تمایل آن به تشکیل و رشد ترک در طول جوشکاری و بعد از آن ارزیابی می‌شود. زمانی که تنش در یک نقطه از جوش، از مقاومت کششی یا برشی نهایی فلز پایه یا فلز جوش تجاوز کند ترک اتفاق می‌افتد. ترک‌ها می‌توانند بلافاصله بعد از پیدایش، در امتداد فلز جوش داده شده توسعه پیدا کنند. ترکیبات شیمیایی فلز پایه و فلز جوش بر حساسیت نسبت به ترک تاثیر مستقیم دارد [۱۸]. شکل ۵ ترک زیر جوش در فلز پایه را نشان می‌دهد.



شکل (۵) ترک زیر جوش در فلز پایه

اگر فلز جوش و ناحیه متأثر از حرارت (HAZ) ترد و سخت باشد احتمال بروز ترک در اتصال بعد از سرد شدن فلز جوش به مراتب بالا می‌رود. ترک‌های کششی به مراتب متداول‌ترند. آنها می‌توانند هم در فلز جوش و هم در فلز پایه اتفاق بیفتند. ترک‌های برشی غالباً در یک زاویه نسبت به ترک‌های کششی اتفاق می‌افتند. و همچنین ممکن است در یک خط در جهت زاویه تنش وارده بر قطعه ادامه پیدا کنند. بیشتر مواقع ترک‌ها بعد

ممکن است سازه تحت بارهای استاتیکی سالم بماند ولی تحت بارهای ترکیبی و سیکلی دچار شکست شود. شکست در اثر خستگی مانند شکست ترد ایجاد شده به وسیله تنش‌های سیکلی که معمولاً محدودیت الاستیکی دارند اتفاق می‌افتد. از آنجایی که تغییرشکل قابل ملاحظه‌ای وجود ندارد قبل از رخداد شکست نهایی خطری آشکارا گویای اینکه شکست در حال وقوع است دیده نمی‌شود. تنش‌های خستگی ممکن است محوری، خمشی، پیچشی و یا ترکیبی از آنها باشند [۲۴]. شکل ۷ ترک سرد ایجاد شده در قطعه را نشان می‌دهد.



شکل (۸) آستانه شروع ترک در چرخنده تایمینگ پورشه

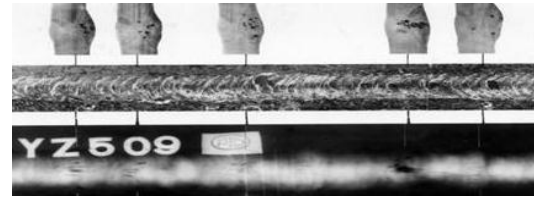
۹۲۸

علل بروز ترک‌های خستگی: بر اثر خواص مواد، شکل اتصال، نرخ تنش، دستورالعمل جوشکاری، عملیات حرارتی بعد از جوشکاری، ترتیب و وضعیت بارگذاری، تنش‌های پسماند، شکل هندسی گرده جوش، تاثیرات محیطی و عیوب جوشکاری باشد. شکل ۸ آستانه شروع ترک در چرخنده تایمینگ پورشه ۹۲۸ را نشان می‌دهد.

### مکانیزم تشکیل ترک‌های خستگی

ترک‌های خستگی معمولاً از میکروترک‌های سطحی، یعنی در جایی که بیشترین مقدار تنش را دارا می‌باشد و در جاهایی که محیط خورنده و تغییرشکل هندسی وجود دارد اتفاق می‌افتد. آغاز ترک به تنش‌های سیکلی که در نتیجه جابه‌جایی متناوب سطوح لغزشی طولی فلز نسبت داده می‌شود. بنابراین ترک‌های اولیه تشکیل و در طول سطوح لغزشی با زاویه ۴۵ درجه نسبت به سطح انتشار می‌یابند [۲۵]. شکل ۹ آغاز ترک در تیرهای جوشی را نشان می‌دهد.

دمای بحرانی را پشت سر گذاشته و از خطر ترک گرم نجات پیدا می‌کند [۲۱]. شکل ۶ ترک گلوبی جوش را نشان می‌دهد.



شکل (۶) ترک گلوبی جوش

وقتی در جوشی ترک اتفاق می‌افتد بدان معنی است که ضمانت و گارانتی تمام شده است و ترک با سرعت باور نکردنی رشد کرده و شکست اتفاق می‌افتد. ترک‌ها به شدت استحکام را کاهش می‌دهند آنها به خصوص تحت بارهای ضربه‌ای به شدت خطرناک بوده به طور ناگهانی منجر به شکست می‌شوند [۲۲].

### ترک سرد

خطرناک‌ترین، پیچیده‌ترین و ناشناخته‌ترین نوع عیب در جوش می‌باشد که به آنها ترک‌های ناشی از هیدروژن و یا ترک‌های تاخیری نیز می‌گویند. این ترک‌ها در اثر تنش‌ها و بعد از انجماد جوش توسعه پیدا می‌کنند از دلایل اصلی بروز این نوع ترک محبوس ماندن هیدروژن در فلز جوش است. علل تشکیل ترک سرد اغلب با تقویت تنش‌های نزدیک ناپیوستگی‌های فلز جوش و فلز پایه یا نزدیک شیارهای مکانیکی قطعه جوش داده شده اتفاق می‌افتد. منبع اصلی هیدروژن در جوشکاری بخارات آبی در قوس جوشکاری می‌باشد و محدوده و میزان آن به نوع فرآیند مورد استفاده بستگی دارد. اتم هیدروژن می‌تواند به اسانی در فولاد نفوذ کرده و در مرز دانه‌ها حرکت کند [۲۳].

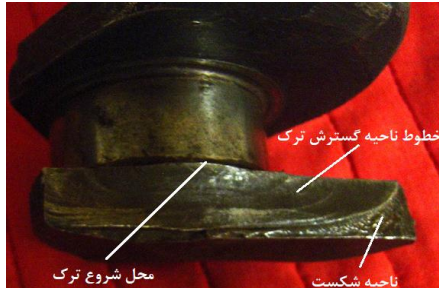


چرخنده تایمینگ پورشه ۹۲۸

شروع ترک در پیشانی قطعه

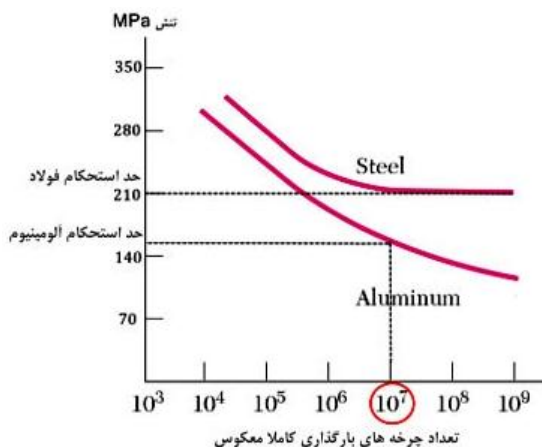
شکل (۷) ترک سرد ایجاد شده در قطعه

الیاف پلیمری شیشه، کربن و آرامید با رزین اپوکسی دو جزئی طراحی شده برای عمل آوری جزئی یا کلی در زیر آب مخصوص تشکیل شده‌اند [۲۷]. شکل ۱۱ شکست خستگی در میل لنگ VW را نشان می‌دهد.

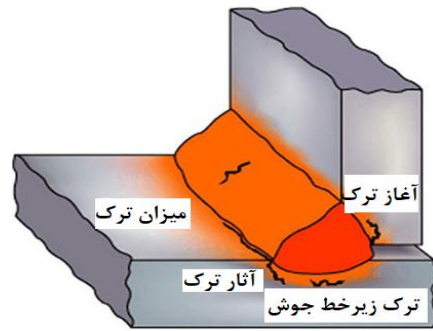


شکل (۱۱) شکست خستگی در میل لنگ VW

یکی دیگر از راه‌حل‌های موجود برای سازه‌های آبی، روش حفاظت کاتدیک می‌باشد. جزء اصلی سیستم حفاظت کاتدیک یک مش اکسید تیتانیوم یا روی به عنوان آند فداشونده است. این مش مانع از خوردگی‌های احتمالی آتی در فولاد می‌شود. هدف از استفاده از آند آن است که به جای فولاد مسلح‌کننده، خورده شود. لذا با این مکانیزم، فولاد مسلح‌کننده به عنوان کاتد در سلول الکتروشیمیایی از خوردگی محافظت می‌شود. این روش می‌تواند برای نگهداری و محافظت المان‌های سازه‌های دریایی، سازه‌های فولادی و همچنین برای اهداف پیشگیرانه در ساخت و ساز جدید مورد استفاده قرار گیرند [۲۸]. شکل ۱۲ نمودار خستگی S-N برای مقاطع مستطیلی فولاد St-37 را نشان می‌دهد.



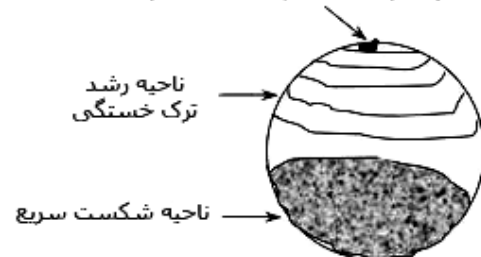
شکل ۱۲. نمودار خستگی S-N برای مقاطع مستطیلی فولاد St-37 [14]37



شکل (۹) آغاز ترک تیرهای جوشی

اگر بار بر روی عضو ثابت باقی بماند تنش افزایش می‌یابد و همان قدر ترک بزرگ می‌شود زیرا سطح مقطع کاهش یافته است. ترک خستگی به صورت بین دانه‌ها پدید می‌آید انتشار آن در بین دانه‌ها بیشتر از مرز دانه‌هاست. به همان اندازه که ترک انتشار می‌یابد تنش‌های پسماند افزایش می‌یابد [۲۶]. بطوریکه یک تقابل افزایشی در نرخ انتشار ترک وجود دارد و در ادامه به مرحله‌ای می‌رسد که سطح باقی مانده نمی‌تواند بار اعمال شده را تحمل کند و در نهایت گسیختگی اتفاق می‌افتد. شکل ۱۰ آغاز ترک و ناحیه شکست را نشان می‌دهد.

شروع ترک ناشی از یک عیب میکروسکوپی سطحی



شکل (۱۰) آغاز ترک و ناحیه شکست

مقاوم‌سازی و محافظت از سازه‌های دریایی اهمیت دو چندان پیدا کرده است. ماهیت خورنده محیط‌های دریایی می‌تواند باعث تخریب سازه‌های دریایی بشود. مقدار پوسیدگی این سازه‌ها با توجه به هر پروژه متفاوت است. شرکت افزیر پیشرو در زمینه مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی مسلح با کامپوزیت‌های پیشرفته در بهسازی، ترمیم و مقاوم‌سازی المان‌های سازه‌ای می‌باشد. یکی از روش‌های محافظتی از سازه‌های دریایی برای کاربردهای زیر آبی، جاکت‌های پیش ساخته می‌باشد که از ترکیب



### جوشکاری فولادهای ساده کربنی

فولادهای کربنی به گروه گسترده‌ای از فولادها اطلاق می‌شود که میزان کربن آنها حداکثر ۱/۷ درصد، مقدار منگنز ۱/۶۵ درصد و حداکثر حاوی ۰/۶ درصد سیلیسیم می‌باشند. عناصر آلیاژی نظیر کروم، نیکل، مولیبدن و ... در این فولادها وجود نداشته یا مقدار آنها خیلی ناچیز است.

فولاد ساده کربنی را می‌توان به چهار گروه تقسیم کرد:

(الف) فولادهای کم کربن با حداکثر ۰/۱۵ درصد کربن  
(ب) فولادهای با کربن جزئی با حداکثر ۰/۱۵-۰/۲۹ درصد کربن

(ج) فولادهای میان کربن با ۰/۳-۰/۵۹ درصد کربن

(د) فولادهای پرکربن با حداکثر ۰/۶-۱/۷ درصد کربن.

بالاترین میزان فولاد در مصارف جوشکاری به دو دسته (الف) و (ب) تعلق دارد. این فولادها عموماً با هر نوع روش جوشکاری معمول قابل جوش دادن هستند که بر حسب ضخامت قطعه، کیفیت مورد درخواست، هزینه و عوامل دیگر، فرآیند و روش خاص انتخاب می‌شود. بر روی فولاد تا ۱/۲۹ درصد و حداکثر ۱/۶ درصد منگنز و ضخامت کمتر از ۲/۵ سانتیمتر بدون پیش‌گرم کردن و یا پس‌گرم کردن خاص، می‌توان جوش کاملاً رضایت بخشی به‌وجود آورد. [۲۹].

در فولادهای کربنی میزان کربن ممکن است از چند صدم درصد تا نزدیک به ۲٪ تغییر کند. افزایش میزان کربن باعث بالا رفتن خواص سختی و استحکام فولاد می‌گردد و مقدار پرلیت را در ساختار میکروسکوپی افزایش می‌دهد، تا اینکه در ۰/۸٪ کربن ساختار زمینه کاملاً پرلیتی خواهد شد. همچنین منگنز خاصیت اکسیژن‌زدایی خوبی دارد. اصولاً میزان منگنز در فولادهای کربنی بین ۰/۵ و ۰/۸ درصد می‌باشد. این عنصر به‌آسانی با گوگرد موجود در مذاب ترکیب شده و سولفید منگنز تشکیل می‌دهد و از ترکیب گوگرد با آهن جلوگیری می‌کند. به‌طور کلی بالا بودن مقدار منگنز باعث درشت شدن دانه‌های فولاد می‌شود. منگنز سختی را بالا برده و منگنز اضافی فولاد را شکننده می‌کند [۳۰].

به منظور بررسی قابلیت جوش‌پذیری فولاد، از کربن معادل استفاده می‌شود. این رابطه برای فولادهای ساده کربنی و کربن-منگنزدار استفاده می‌شود، اما در فولادهای کم‌آلیاژ پر استحکام میکروآلیاژی یا فولادهای نوع کم‌آلیاژ کروم-مولیبدن کاربرد ندارند. رابطه مورد قبول جامعه مهندسی جوشکاری ژاپن که توسط ایتو<sup>۱</sup> و بسیو<sup>۲</sup> به دست آمد به‌صورت رابطه ۲،۲ است. در این رابطه نیز همانند رابطه کربن معادل IIW، تمامی عناصر بر حسب درصد جرمی بیان می‌شوند. Pcm نسبت به رابطه IIW، بر بازه وسیع‌تری از فولادها تکیه دارد. Pcm، به‌صورت پارامتر ترکیب شیمیایی نیز نامیده می‌شود. بر اساس استاندارد AWS D 1.1، ضمیمه XI، می‌توان از مقدار پارامتر ترکیب شیمیایی برای پیش‌بینی مقدار هیدروژن استفاده کرد [۳۱].

### نتیجه‌گیری

وقتی نمونه‌ای از همان ماده وقتی در معرض بارهای چرخشی یا متناوبی قرار می‌گیرد، تحت تنش بسیار کوچکتری خواهد شکست بدین طریق، یک محور ممکن است بعد از ماه‌ها استفاده بشکند، حتی اگر بیشترین بار آن هم افزایش نیافته باشد و هرگاه تنش به مقدار کافی برسد، عمل لغزش روی صفحات بلورین انفرادی رخ خواهد داد. در مرحله اول ممکن است این لغزش اشکالی ایجاد نکند ولی با تکرار عمل لغزش ترک‌های ریز تشکیل شده و گسترش پیدا می‌کنند و در نتیجه سطح مقطع یک عضو نیز کاهش یافته بطوریکه دیگر نیروی وارد شده را تحمل نخواهد کرد. در قسمت نهایی شکست ساختمان بلورین فلزی با قسمت‌های مجاور مدتی ایجاد اصطکاک می‌کند. گاهی اوقات مقطع نهایی موجب اشتباه شدن نتیجه آزمایش می‌گردد، زیرا که قطعه بعلت تبلور مجدد در جریان کار، دارای دانه درشت شده و می‌شکند. این شکست‌ها شکست‌های خستگی هستند و در طراحی قطعاتی که در معرض تنش‌های متغیری قرار دارند حد خستگی یک ماده غالباً مهم‌تر از مقاومت کششی یا مقاومت تسلیم آن است. با وجود

1 Ito

2 Bessyo

- محدود. مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، ۴۶(۲)، ۱۳۹-۱۲۵.
- [۶] نیک مهر، م.، آزادی، م. (۱۳۹۵). تخمین نرخ رشد ترک خستگی با فاصله موج ها در سطح شکست آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴. دومین همایش یافته های نوین هوافضا، مکانیک و علوم وابسته.
- [۷] امیریان، ج.، شیرانی، م. (۱۳۹۶). مقایسه نظریه های مختلف پیش بینی شکست خستگی نمونه های فاق دار فولاد CK45.
- [۸] معتمدی، ح.، صادقیان، م.، حسینی عقدا، س. ا. (۱۳۹۶). مقایسه مقاومت خستگی و انرژی شکست مخلوط های آسفالتی حاوی اصلاح کننده های ساسوبیت و پارافایبر. نهمین همایش قیر و آسفالت ایران.
- [۹] اسدی، م.، معیری کاشانی، ح. (۱۳۹۷). شبیه سازی شکست خستگی در شاسی دستگاه مارپیچ انتقال مواد فله. سومین کنفرانس بین المللی مهندسی مکانیک و هوافضا.
- [۱۰] سمیعی، م.، آزادی، م. (۱۳۹۷). تخمین عمر خستگی کم چرخه آلیاژ آلومینیوم - سیلیسیوم- منیزیم سرسیلندر موتور براساس آثار موجی شکل در سطح شکست و رابطه رشد ترک پاریس. بیست و ششمین همایش سالانه بین المللی انجمن مهندسان مکانیک ایران.
- [۱۱] رحمانی، ع.، نظام آبادی، ع. (۱۳۹۸). تحلیل شکست ناشی از خستگی - خوردگی پره های کمپرسور توربین گازی. ششمین کنفرانس سالانه ملی مهندسی مکانیک، صنایع و هوافضا ایران.
- [۱۲] محمدی، م.، جمشیدی، ن. (۱۳۹۸). آنالیز فلاتر پره روتاری مرحله اول کمپرسور یک مدل توربین گاز با وجود مشکلات ارتعاشی و حوادث شکست خستگی مکانیکی. بیست و هفتمین کنفرانس بین المللی انجمن مهندسان مکانیک ایران.
- [۱۳] سکاکی، م. (۱۳۹۵) «خستگی مواد و فلزات و تحلیل مراحل و نحوه وقوع خستگی و آزمون های خستگی». سایت گروه مهندسی مکاسیس.
- [14] Y. Furuya, "Gigacycle Fatigue Properties of Double-Melted SCM440 Steel and Size Effects," Tetsu-to-Hagane, vol. 99, no. 5, pp. 373-379, 2013.
- [15] J. Lankford and F. N. Kusenberger, "Initiation of fatigue cracks in 4340

استاندارد بودن پارامترهای جوشکاری، عدم جوش خوردگی در دو انتهای صفحه عمودی متصل شده به صفحه زیرین می تواند به نقطه شروع شکست باشد و اینکه اتصال صفحه عمودی به صفحه زیری می تواند در سیکل های ارتعاشی به عنوان نقطه ضعف عمل کرده و در هر دو انتهای ورق عمودی تمرکز تنش ایجاد نموده و باعث ایجاد ترک و در نهایت شکست قطعه می شود و به دلیل وجود تمرکز تنش در انتهای محل اتصال دو ورق و ایجاد ترک، این طرح اتصال نمی تواند چرخه های ارتعاشی زیاد را تحمل نماید. در صورت استفاده از طرح اتصال جوشکاری با نفوذ کامل، بسته به نوع بارگذاری باید لبه های ورق بالایی پخ مناسب ایجاد شود و همچنین فاصله ریشه ورق به مقداری باشد تا نفوذ جوش به صورت کامل و قوی ایجاد شود. در مواردی که به اتصال سپری جهت سازه نیازمند می باشد، در صورتی که سازه تحت بارگذاری پرچرخه با میزان بارگذاری کمتری باشد، استفاده پروفیل های سپری نسبت به اتصالات سپری جوشکاری شده دارای دوام بیشتری می باشد.

## منابع

- [۱] سمیع زاده، م.، فرهنگی، ح.، سلطانی، ن. (۱۳۸۵). بررسی شکست خستگی و عمر رشد ترک در پره های فن روتور ژنراتور یک نیروگاه حرارتی. مکانیک هوا فضا.
- [۲] میرزایی، م.، کریمی، ر. (۱۳۸۰). تعیین سرعت رشد ترک در پره توربین گازی بر اساس مکانیک شکست. فنی و مهندسی مدرس.
- [۳] آیت الهی، م.، چمنی، ح.، محمدی، ف. (۱۳۹۰). ارزیابی عمر خستگی حرارتی مکانیکی قطعات گرم موتور دیزل. تحقیقات موتور.
- [۴] سیفی، ر.، حکیمی، ح. (۱۳۹۵). بررسی رشد ترک خستگی ناشی از خمش در استوانه های اتوفرتاژ شده با ترک خارجی. مهندسی مکانیک مدرس (فنی و مهندسی مدرس).
- [۵] مامندی، ا.، احمد، رجبی، مصطفی. (۱۳۹۵). تحلیل مکانیک شکست و تخمین عمر رشد ترک خستگی پره توربین گاز با استفاده از روش المان

- Procedia Engineering, vol. 2, no. 1, pp. 387-396, 2010/04/01 2010.
- [25] M. Bacher-Hoechst and S. Issler, "How to Deal with Very High Cycle Fatigue (VHCF) Effects in Practical Applications?," *Materials Testing*, vol. 54, no. 11-12, pp. 742-745, 2012/11/01 2012.
- [26] S. Kovacs, T. Beck, and L. Singheiser, "Influence of mean stresses on fatigue life and damage of a turbine blade steel in the VHCF-regime," *International Journal of Fatigue*, vol. 49, pp. 90-99, 4// 2013.
- [27] T. Sakai, "Review and Prospects for Current Studies on Very High Cycle Fatigue of Metallic Materials for Machine Structural Use," *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, vol. 3, no. 3, pp. 425-439, 2009.
- [28] Y. Murakami, S. Kodama, and S. Konuma, "Quantitative evaluation of effects of non-metallic inclusions on fatigue strength of high strength steels. I: Basic fatigue mechanism and evaluation of correlation between the fatigue fracture stress and the size and location of non-metallic inclusions," *International Journal of Fatigue*, vol. 11, no. 5, pp. 291-298, 1989/09/01 1989.
- [29] P. Grad, B. Reuscher, A. Brodyanski, M. Kopnarski, and E. Kerscher, "Mechanism of fatigue crack initiation and propagation in the very high cycle fatigue regime of high-strength steels," *Scripta Materialia*, vol. 67, no. 10, pp. 838-841, 11// 2012.
- [30] T. Sakai et al., "Statistical duplex S-N characteristics of high carbon chromium bearing steel in rotating bending in very high cycle regime," *International Journal of Fatigue*, vol. 32, no. 3, pp. 497-504, 3// 2010.
- [31] K. Shiozawa, Y. Morii, S. Nishino, and L. Lu, "Subsurface crack initiation and propagation mechanism in high-strength steel in a very high cycle fatigue regime," *International Journal of Fatigue*, vol. 28, no. 11, pp. 1521-1532, 11// 2006.
- [32] Design for Strength, Module-3, NPTEL Course Ware, IITKGP.
- steel," *Metallurgical Transactions*, vol. 4, no. 2, pp. 553-559, 1973// 1973.
- [16] Ray, S. K. Paul, and S. Jha, "Effect of Inclusions and Microstructural Characteristics on the Mechanical Properties and Fracture Behavior of a High-Strength Low-Alloy Steel," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 4, no. 6, pp. 679-688, 1995// 1995.
- [17] W. A. Spitzig and R. J. Sober, "Influence of sulfide inclusions and pearlite content on the mechanical properties of hot-rolled carbon steels," *Metallurgical Transactions A*, vol. 12, no. 2, pp. 281-291, 1981// 1981.
- [18] Gabelli, J. Lai, T. Lund, K. Rydén, I. Strandell, and G. E. Morales-Espejel, "The fatigue limit of bearing steels – Part II: Characterization for life rating standards," *International Journal of Fatigue*, vol. 38, pp. 169-180, 5// 2012.
- [19] C. Liu, S. Yang, J. Li, L. Zhu, and X. Li, "Motion Behavior of Nonmetallic Inclusions at the Interface of Steel and Slag. Part I: Model Development, Validation, and Preliminary Analysis," *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol. 47, no. 3, pp. 1882-1892, 2016// 2016.
- [20] T. Billaudeau and Y. Nadot, "Support for an environmental effect on fatigue mechanisms in the long life regime," *International Journal of Fatigue*, vol. 26, no. 8, pp. 839-847, 8// 2004.
- [21] T. Nakamura, H. Oguma, and Y. Shinohara, "The effect of vacuum-like environment inside sub-surface fatigue crack on the formation of ODA fracture surface in high strength steel," *Procedia Engineering*, vol. 2, no. 1, pp. 2121-2129, 2010/04/01 2010.
- [22] J. Petit, C. Sarrazin-Baudoux, and F. Lorenzi, "Fatigue crack propagation in thin wires of ultra high strength steels," *Procedia Engineering*, vol. 2, no. 1, pp. 2317-2326, 2010/04/01 2010.
- [23] C. Ruffing, Y. Ivanisenko, and E. Kerscher, "A comparison of the fatigue and fracture behavior of high strength ultrafine grained medium carbon steel SAE 1045 with high strength bearing steel SAE 52100," *Procedia Structural Integrity*, vol. 2, pp. 3240-3247, // 2016.
- [24] E. resign, P. E. Irving, and M. J. Robinson, "Development and early growth of fatigue cracks from corrosion damage in high strength stainless steel,"