

رویکردهای تحمل آسیب و AISC



در این مقاله دو روش طراحی خستگی را بررسی می‌کنیم: AISC و تحمل آسیب. AISC بر مبنای فلسفه زندگی بی‌خطر استوار است – اگر مهندس تنش را به اندازه کافی پایین نگه دارد، سازه به نحو مناسبی عمل خواهد کرد. در این روش فرض می‌شود که ترک خوردگی در انتهای عمر سازه‌ها رخ می‌دهد. روش تحمل آسیب دیدگاه متفاوتی نسبت به سازه دارد. در این روش فرض می‌شود که سازه ذاتاً در محل‌های بحرانی از اولین روز استفاده دارای ناپیوستگی‌هایی می‌باشد. این ناپیوستگی‌ها نیاز به بازرسی ندارند، اما به مرور زمان رشد می‌کنند. مهندس سختی و نحوه بازرسی سازه را طراحی می‌کند. این کار در یک سیستم حلقه بسته انجام می‌شود و بازخورد آن در مراحل بحرانی در عمر سازه دریافت می‌شود.

AASHTO – سازمان حمل و نقل جاده‌ای ایالتی آمریکا

AISC – موسسه ساخت و ساز فولادی آمریکا

AREMA – سازمان مهندسی راه‌آهن و نگهداری راه آمریکا

طراحی خستگی AISC

مفاهیم عمومی:

روش طراحی خستگی AISC بسیار شبیه به روش ارائه شده در AASHTO و AREMA است. مفاهیم کلیدی طراحی خستگی AISC عبارت‌اند از:

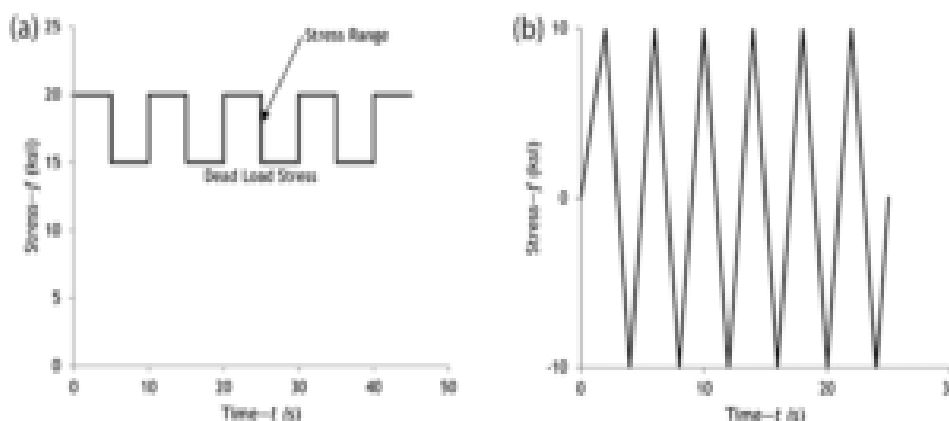
- طراحی خستگی در صورتی که سازه کمتر از ۲۰۰۰۰ چرخه را تجربه کند یا هنگامی که بازه تنش کمتر از آستانه- F^{th} باشد، ضرورت ندارد. از بارهای سرویس استفاده کنید (ترکیب‌های بار تنش مجاز).

- مقررات AISC فرض می‌کند که محافظت کافی در برابر خوردگی وجود دارد.
- محاسبه تعداد چرخه‌ها می‌تواند در بهترین حالت یک حدس باشد. با بهره‌بردار صحبت کنید و محافظه کار باشید.

محاسبه تنش:

هنگام محاسبه‌ی تنش‌ها، باید موارد زیر را در نظر بگیریم:

- از تحلیل تنش الاستیک استفاده کنید.
 - اثرات اهرمی در پیچ و مهره‌ها را در نظر بگیرید.
 - اثرات خروج از محوریت را در نظر بگیرید.
 - از تمرکز تنش صرف نظر کنید (مقادیر جدول این اثرات را در نظر می‌گیرند).
- بازه تنش را تنها با در نظر گرفتن تنش‌های نوسانی محاسبه می‌کنیم، نه تنش‌های کل. تنش‌های دائمی مانند بارهای مرده در بازه تنش خستگی تأثیری نمی‌گذارد.



شکل ۱- مثال‌های بازه‌ی تنش (a) تنش دائمی بالا و (b) تنش کاملاً بازگشتی

مثلاً اگر یک بار دوره‌ای ۵ ksi به همراه یک بار مرده ۱۵ ksi باشیم (شکل ۱a)، بازه تنش همان ۵ ksi خواهد بود. ممکن است اشتباه کنیم و بازه تنش را ۲۰ ksi در نظر بگیریم که به طراحی به مراتب سنگین‌تر منجر خواهد شد.

در شرایط دیگری اگر یک تنش ۱۰ ksi بازگشتی وجود داشته باشد و هیچ بار دائمی وجود نداشته باشد (شکل ۱b)، بازه تنش ۲۰ ksi خواهد بود. دلیل این موضوع این است که ما تنش‌های پیک تا پیک را با هم جمع می‌زنیم. اگر ما تنش از صفر تا پیک را در نظر بگیریم، بازه تنش را دو برابر کمتر از مقدار واقعی پیش‌بینی خواهیم کرد.

بازه تنش مجاز:

وقتی که مهندس با دقت بازه تنش را محاسبه کرد، باید آن را با بازه تنش مجاز مقایسه کند. دو راه برای این کار وجود دارد؛ محاسبه بازه تنش بر اساس تعداد چرخه‌ها یا حد تنش تا آستانه. توضیحی در مورد هر دو روش در ادامه آمده است. با استفاده از تخمین تعداد چرخه‌ها، بازه تنش مجاز، F_{SR} را می‌توان با استفاده از معادله زیر به دست آورد:

$$F_{SR} = \left(\frac{C_f}{n_{SR}} \right)^{0.333} \geq F_{TH}$$

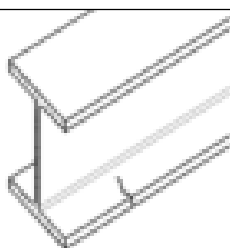
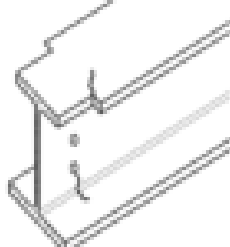
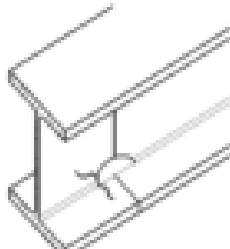
که در آن:

C_f = فاکتوری که از جداول AISC به دست می‌آید

n_{SR} = تعداد چرخه‌ها در عمر طراحی

F_{TH} = آستانه بازه تنش خستگی

اگر طراحی سازه بر اساس تنش آستانه خستگی باشد، مهندس می‌تواند به راحتی اجزا را ارزیابی کند، به نحوی که بازه تنش کمتر از مقادیر آستانه‌ای که در شکل ۲ نشان داده شده است باشد. با وجود اینکه این مقادیر عدم ترک خوردگی در طول عمر سازه را تضمین نمی‌کند، نقطه شروع خوبی است و می‌توان آن را با برنامه بازرسی استوار برای اطمینان از عملکرد ایمن سازه ترکیب کرد.

شکل	شرح	دسته تنش	ثابت C_f	آستانه F_{TH}
1	 فلز پایه	A	250×10^6	24
2	 سوراخ و گوشه‌های ترک خورده	B	120×10^6	16
3	 مقاطع نورد شده همراه با سوراخ در دسترس جوش	C	44×10^6	10

شکل ۲ - داده‌های طراحی خستگی AISC، AASHTO یا AREMA

روش تحمل آسیب:

تحمل آسیب روش طراحی سنتی را از بین برد. به جای اینکه بگوییم اگر تنش‌ها به اندازه کافی کوچک باشند هیچ مشکلی پیش نمی‌آید؛ فرض می‌کنیم که مشکلی وجود دارد و ما باید طراحی را بر حسب آن انجام دهیم. مهندس باید فرض کند که در بحرانی‌ترین نقاط در سازه ناپیوستگی‌هایی وجود دارد و برای آن ناپیوستگی‌ها طراحی لازم را انجام دهد. در زیر کلیات نحوه انجام این کار آمده است:

- ۱- محل‌های بحرانی سازه بعد از ساخت را بازرسی کنید.
- ۲- فرض کنید که ناپیوستگی‌های ذاتی حداقل به اندازه آستانه قابل پیدا شدن وجود دارند.
- ۳- از مکانیک شکست برای پیش‌بینی اندازه ترک بحرانی استفاده کنید.
- ۴- از روابط مکانیک شکست برای پیش‌بینی زمان لازم برای رسیدن ترک به اندازه بحرانی استفاده کنید.
- ۵- بازرسی‌ها را در فواصل زمانی انجام دهید که کمتر از زمان لازم برای رسیدن به اندازه بحرانی ترک‌ها باشد.
- ۶- ترک‌ها را تعمیر کنید یا عضو یا سازه را از سرویس خارج کنید.

مکانیک شکست:

قبل از اینکه A.A. Griffith نظریه گسترش ترک خود در شیشه را ارائه دهد و Irwin آن را توسعه دهد و برای دیگر مصالح در سال ۱۹۴۸ قابل استفاده کند، روش‌های طراحی نمی‌توانستند با صراحت ترک‌ها را در نظر بگیرند. هیچ‌کس نمی‌تواند به صورت تحلیلی پیش‌بینی کند که تا چه اندازه‌ای ترک به صورتی ناپایدار گسترش می‌یابد.

مکانیک شکست زمانی شروع شد که Griffith تلاش می‌کرد که اثر عملیات سطحی را بر مقاومت قطعات فلزی با بارگذاری دوره‌ای بسنجد. برای کاهش سردرگمی احتمالی ناشی از تغییر شکل پلاستیک، او شروع به آزمایش شیشه کرد زیرا در دمای اتاق دارای رفتار شکننده‌ای است. بعد از تحقیقات از سال ۱۹۱۸ تا ۱۹۲۰، Griffith بیان کرد که ترک ممکن است هنگام تغییر انرژی الاستیک، تشکیل شود، زیرا طول ترک، معادل انرژی لازم برای آن اندازه رشد بود. Griffith از این مفهوم برای مصالح الاستیک خطی و ارائه رابطه زیر استفاده کرد.

$$\frac{\sigma \sqrt{\pi c}}{K} = \frac{\sqrt{2E\gamma}}{K_c}$$

که در این رابطه:

σ = تنش دور از میدان

E = مدول الاستیک

γ = کشش سطحی

C = نصف طول ترک نمونه‌ای که از وسط ترک خورده است.

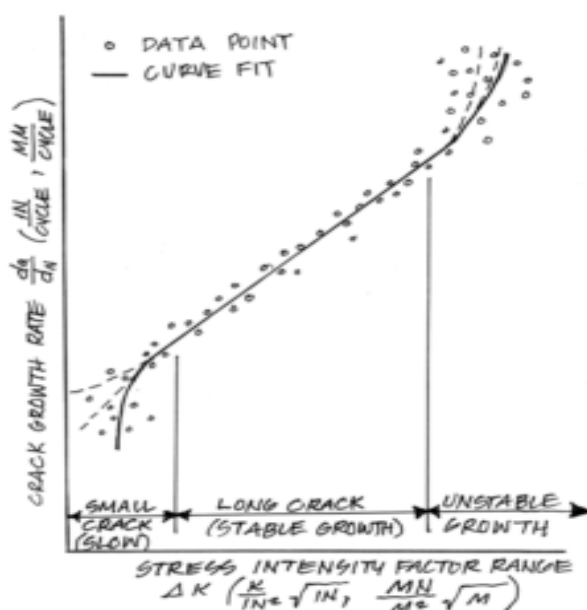
هنگامی که طرف راست برابر با طرف چپ باشد، شکست اتفاق خواهد افتاد. تنها چالش حل معادله این است که گاما، γ را نمی‌توان به راحتی به دست آورد؛ بنابراین در واقع هیچ‌کس از رابطه Griffith استفاده نمی‌کرد تا زمانی که George Irwin آن را در آزمایشگاه تحقیقاتی ناوال چند دهه بعد تصحیح کرد. Irwin پیشنهاد کرد که طرف راست معادله Griffith را می‌توان به صورت تجربی تعیین کرد و آن را سختی شکست نامید. هر وقت که طرف راست معادله Griffith یعنی فاکتور شدت تنش K ، برابر با سختی K_c باشد، گسترش ترک به صورت ناپایدار شروع می‌شود (تقریباً با $1/3$ سرعت نور در مصالح) با استفاده از این مفاهیم بسیاری از تحلیل‌گران راه‌حل‌های شدت تنشی را برای هندسه‌ها و شرایط بارگذاری‌های مختلف توسعه داده‌اند. این راه‌حل‌ها در هندبوک‌های مختلف موجود است.

این پیشرفت‌ها دنیای جدیدی را در پیش‌بینی رفتار شکست باز کرد. دیگر رفتار شکست تنها بر مبنای تجربه نبود و مهندسان می‌توانستند رفتار سازه‌هایی که هنوز ساخته نشده بود را پیش‌بینی کنند. Irwin گفت: اهمیت عملی مکانیک شکست هنگامی مشخص می‌شود که فردی سعی می‌کند که پیش‌تخمین‌های تنش‌ها، اندازه‌های ترک‌ها و سختی مصالح را برای محاسبه پیشرفت در یک بار سرویس که نسبت به پیشرفت شکست ایمن خواهد بود، با هم ارتباط دهد.

قدرت مکانیک شکست این است که به طراح اندازه‌ی ناپیوستگی ترک ماندی را که سازه می‌تواند قبل از ناپایداری‌اش تحمل کند را می‌گوید. سپس می‌توان زمان لازم برای یک ترک خستگی تا رسیدن به اندازه بحرانی را به دست آورد. فلسفه عمر ایمن نمی‌تواند این کار را انجام دهد.

روابط خستگی:

با توسعه مکانیک شکست برای خستگی، مهندس می‌تواند تغییر طول ترک را به بازه فاکتور شدت تنش در هر دوره مرتبط سازد. این کار را با استفاده از منحنی da/dN نسبت به ΔK مانند چیزی که در شکل ۳ نشان داده شده است انجام می‌شود. منحنی بر اساس داده‌های آزمایشی است و به دلیل این که به تغییر در فاکتور شدت تنش بستگی دارد، می‌توان آن را به اجزای مختلف و هندسه‌های ترک مختلف بسط داد.



شکل ۳ - منحنی رابطه‌ی خستگی da/dN نسبت به ΔK

با به دست آوردن داده‌ها از منحنی و تشکیل یک معادله و بازآرایی معادله به صورتی که da و dN در دو طرف معادله قرار داشته باشند و انتگرال گیری بر حسب اندازه ترک a ، عمر نهایی را محاسبه می‌کنیم. مزیت اصلی ارائه داده‌های خستگی به این شکل، صراحت آن در نظر گرفتن اندازه ناپیوستگی اولیه است.

بازرسی:

نسبت بازرسی به تحمل آسیب مانند نسبت روش‌های انرژی به استاتیک است. بازرسی به مهندس اجازه می‌دهد که بداند وضعیت ناپیوستگی اولیه سازه به چه دلیل است و همچنین تغییرات آن در طول عمر سازه را ارزیابی کند. بازرسی بازخورد در یک سیستم حلقه بسته است. پس داشتن یک برنامه بازرسی منطقی و استوار خیلی مهم است.

اجزای کلیدی هر برنامه بازرسی عبارت‌اند از:

- ۱- دنبال چه چیزی هستیم؟
- ۲- چه زمانی به دنبال آن باشیم؟
- ۳- چگونه به دنبال آن بگردیم؟
- ۴- کجا دنبال آن بگردیم؟
- ۵- هر چند وقت دنبال آن بگردیم؟
- ۶- آستانه‌ی قابل ردیابی
- ۷- احتمال ردیابی

ابتدا به صورت خلاصه نحوه بازرسی یا روش‌های بازرسی را مرور می‌کنیم. روش‌های آزمایش غیر مخرب می‌تواند به دو دسته سطحی و داخلی تقسیم شود. هر گروه برای مکان خاصی به کار رفته و قابلیت خاص خود برای کشف ناپیوستگی را دارد.

۱) سطحی

A) ذرات مغناطیسی

B) جریان آشفته

C) نفوذ مایع

۲) داخلی

A) اولتراسونیک

B) رادیوگرافیک

ذره مغناطیسی و اولتراسونیک معمول‌ترین آزمایشات در سازه‌های شهری برای به دست آوردن ترک‌های سطحی و داخلی است.

با استفاده از چند تکنیک بازرسی با آستانه ردیابی، می‌توانیم تعیین کنیم که اندازه ترک اولیه ما برای طراحی چقدر است. شکل ۴ کمترین و بیش‌ترین اندازه‌های ترک که هر روش آزمایش می‌تواند پیدا کند را نشان می‌دهد.

روش آزمایش	اندازه‌های ناپیوستگی			
	کمترین مقدار		بیشترین مقدار	
	اینچ	میلی‌متر	اینچ	میلی‌متر
سطحی				
نفوذ مایع	0.017	0.43	0.700	17.78
ذره مغناطیسی	0.039	0.99	0.237	6.02
جریان گردابی	0.022	0.56	0.750	19.05
داخلی				
اولتراسونیک	0.014	0.36	0.265	6.73
راديوگرافيك	0.024	0.61	0.729	18.52

شکل ۴ - آستانه‌های ردیابی ترک آزمایش‌های غیر مخرب

به کمک تحمل آسیب ما طراحی را که بر مبنای اندازه ترک اولیه، نرخ رشد ترک و سختی شکست است، شروع می‌کنیم. این طراحی باید با بازرسی و به دست آوردن بازخورد در نقاط کلیدی عمر سازه همراه باشد. این بازرسی تصویر شفاف‌تری از آنچه اتفاق می‌افتد به ما می‌دهد تا اینکه فقط تنش را در سطح پایینی نگه داشته و امیدوار باشیم که اتفاقی نیافتد.

ملاحظات ساخت:

صرف‌نظر از روش طراحی که انتخاب می‌کنیم، ساخت محتاطانه هم برای عملکرد مناسب سازه‌ها کلیدی است. در اینجا تعدادی از الزامات کلیدی AISC و AWD D۱,۵ آیین نامه جوشکاری پل را مرور می‌کنیم.

مقررات خستگی عمومی AISC شامل موارد زیر است:

- در جوش‌های نفوذی کامل تسمه‌های پشتیبان را بردارید. مؤلف پیشنهاد می‌کند که تمام تسمه‌های پشتیبان را بردارید – که می‌توان این کار را به راحتی با پشتیبان‌های مسی یا سرامیکی انجام داد.
- لبه‌های بریده شده با گرما را تا ۱۰۰۰ میکرو اینچ تیز کنید.
- یک شعاع ۳/۸ اینچی در لبه‌های بریده شده با دما قرار دهید.
- پیچ و مهره‌ها را پیش کشیده کنید.

AWS D۱,۵ تعاریف و مقررات روشنی را برای موارد زیر مقرر می‌کند:

- طراحی
- طرز کار
- روش
- کیفیت‌سنجی فرآیند
- بازرسی

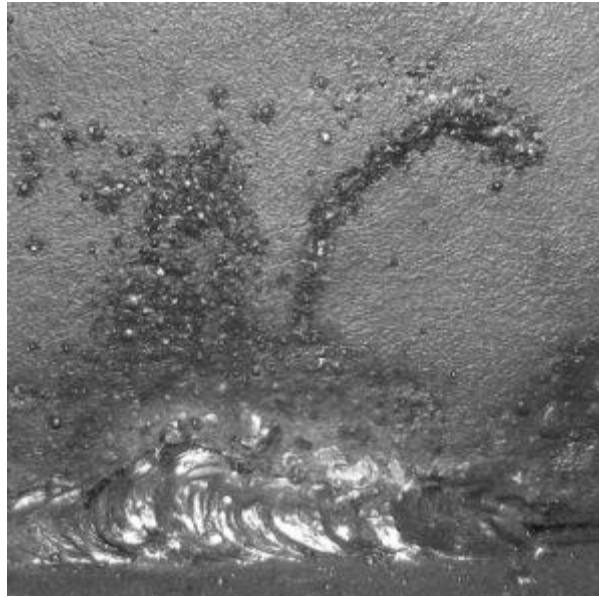
- تعمیر
- برنامه کنترل شکست برای ساخت
 - اسناد پیمان
 - فلز پایه
 - فرآیند جوشکاری
 - مواد مصرفی
 - گواهینامه و تائید کیفیت
 - برش
 - تعمیر
 - راست کردن
 - جوش‌های رویه
 - پیش گرمایش و دمای بین پاس‌ها
 - عملیات گرمایی
 - بازرسی

به خاطر داشته باشید که تمام این‌ها مقررات ساخت است و هیچ کاری برای نگهداری در حالت بهره‌برداری یا بازرسی انجام نمی‌دهند.

پانچ سوراخ و ضربات قوس، دو ملاحظه ساختی هستند که مهندس باید در ساخت فولادی به آن‌ها توجه کند.

وقتی سازنده سوراخ‌ها را پانچ کند، ترک‌های کمی در اطراف لبه‌ها باقی می‌ماند. معمولاً در این مورد مسئله‌ای وجود ندارد. با این وجود در سازه‌های حساس به خستگی، این ترک‌ها می‌تواند رشد کند. برای برآورده کردن این موضوع یک سازنده می‌تواند یک سوراخ را به اندازه کمتری از مقدار لازم پانچ کرده و سپس آن را تا اندازه نهایی گشاد کرده یا مثلاً با دریل به اندازه نهایی برساند.

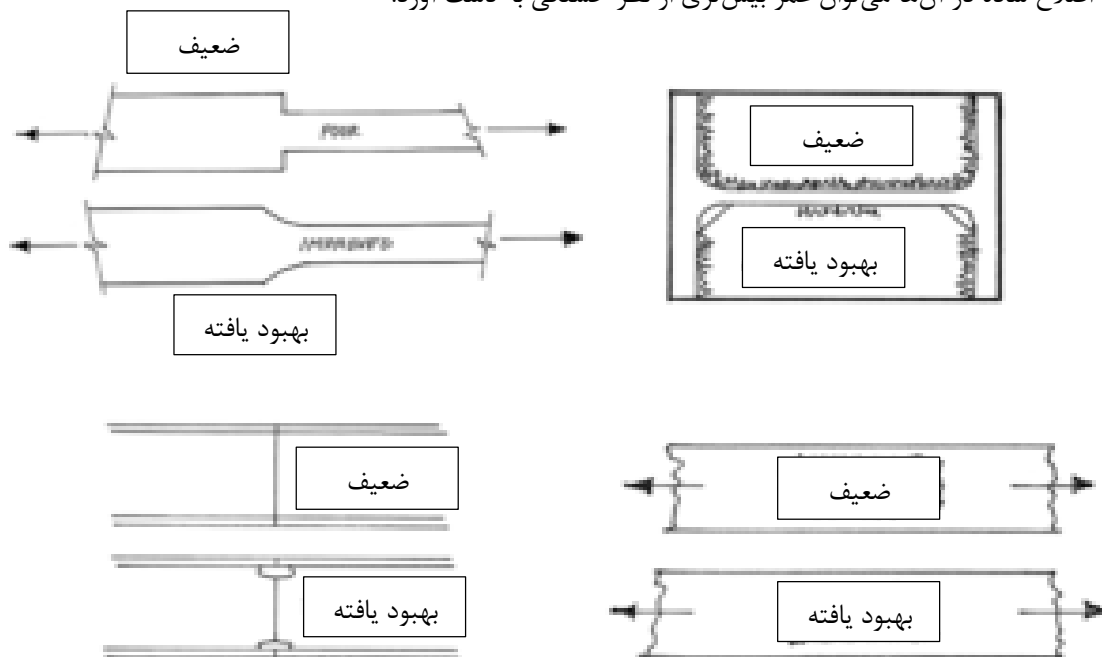
هنگامی که جوشکار به صورت تصادفی الکتروود جوش را به قطعات فولادی می‌زند، قوس تشکیل شده و یک رده از چاله‌های کوچک مانند آنچه در شکل ۵ نشان داده شده است، تشکیل می‌شود. این گودال‌ها یک فاز فولاد مارتنزیتی را به جای می‌گذارد که خیلی سخت و مستعد ترک خوردن است. بسیاری از شکست‌های خستگی از محل چنین ضرباتی شروع می‌شوند. برای اصلاح آن‌ها باید آن‌ها را سایید تا به فلز سالم برسیم و سپس از آزمایش ذره مغناطیسی برای کنترل ترک‌های سطحی استفاده کرد.



شکل ۵ - ضربه‌ی قوس بر روی یک عضو فولاد سازه‌ای

جزئیات:

در پایان نگاهی به بعضی از ملاحظات در جزئیات می‌اندازیم. یک شکاف در ساخت و ساز تجاری معمولاً مشکلی پیش نمی‌آورد، اما در سازه حساس به خستگی می‌تواند بحرانی باشد. حالا نگاهی به چهار جزئیات نشان داده شده در شکل ۶ بیاندازید که با یک اصلاح ساده در آن‌ها می‌توان عمر بیش‌تری از نظر خستگی به دست آورد.



شکل ۶ - مثال‌هایی از جزئیات ضعیف و بهبود یافته در برابر خستگی

توجه کنید که تغییرات در جهت نرم کردن شکاف‌ها، کاهش محدودیت‌ها و کاهش تنش‌های پسماند جوشکاری است.

نتیجه گیری:

این مقاله مفاهیم بنیادی طراحی برای خستگی سنتی و یک روش جایگزین بهتر یعنی تحمل آسیب را ارائه داده است. هنگامی که ما اندازه ترک اولیه، طاقت، مکانیک شکست و بازرسی را با هم استفاده می کنیم می توانیم بهتر برای طراحی و ارزیابی ترکها در سازه هایمان عمل کنیم.

مترجم: علی اکبر خلیلی

منبع:

<http://www.structuremag.org/?p=۱۰۶۸۴>