

## بررسی آزمون خستگی و سختی با سیکل کم جوش لب به لب الکترو دستی فولاد کم آلیاژ در نقاط توقف و شروع قوس

حمید محمدی مزرعه<sup>۱</sup> و دکتر غلامرضا خیاطی<sup>۲</sup> (نویسنده مسئول)

<sup>۱</sup> گروه مهندسی مواد جوشکاری واحد بندرعباس، دانشگاه آزاد اسلامی، بندرعباس، ایران  
<sup>۲</sup> استادیار-مهندسی مواد و متالورژی-دانشگاه شیراز

### چکیده

در این تحقیق خواص خستگی کم چرخه در مناطق پیوسته جوشکاری شده و در نقاط توقف و شروع قوس جوش لب به لب فولاد کم آلیاژ با استحکام کششی بالا مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور فولاد ASTM A633 گرید D، به روش جوشکاری قوس الکتریک دستی به صورت لب به لب جوشکاری شده است. از نقاطی که قوس پیوسته تداوم داشته و از نقاطی که قوس قطع و دوباره برقرار شده بود، نمونه هایی بر اساس استاندارد ASTM E466 برای انجام آزمون سختی و خستگی تهیه شد. آزمایش کشش و سختی سنجی بر روی نمونه ها نشان داد که علیرغم افزایش استحکام کششی و سختی در نقاط توقف و شروع قوس، استحکام خستگی کاهش یافته است.

**واژه‌های کلیدی:** جوش لب به لب قوس الکتریک، مقاومت خستگی، فولاد کم آلیاژ، نقاط توقف و شروع قوس.

## مقدمه

شکست‌هایی که تحت شرایط بارگذاری نوسانی رخ می‌دهند، شکست‌های خستگی نامیده می‌شوند. خستگی یکی از اصلی‌ترین عوامل خرابی در سازه‌های جوشکاری شده است و بنابراین هنگام طراحی و ساخت سازه‌های جوشکاری شده، معیار خستگی باید لحاظ شود. در مرحله‌ی طراحی، هندسه و بارگذاری اتصال جوشکاری، پارامترهای اصلی است. عیوب جوش در سازه‌های جوشی غیر قابل اجتناب است و این عیوب تاثیرهای قابل ملاحظه‌ای در استحکام سازه‌های جوشی دارند. صنایع دریایی، به منظور ساخت بدنه‌ی فشار زیر دریایی، ساخت جرثقیل‌های بزرگ و در صنایع نفت و گاز برای ساخت لوله‌ها و مخازن تحت فشار و ... استفاده می‌شود. از آن جایی که شرایط کاری سازه‌های دریایی عمدتاً در دمای پایین می‌باشد، لذا این سازه‌ها به شکست ترد حساس بوده و گزارش‌ها حاکی از آن است که منشاء ترک که باعث این شکست می‌شود، از منطقه‌ی جوش جوانه زده و در فلز جوش یا منطقه‌ی متأثر از حرارت رشد می‌کند. علاوه بر این سازه‌های دریایی تحت تاثیر نیروهای هیدروینامیکی ناشی از تلاطم آب قرار دارند، لذا بحث خستگی روی این سازه‌ها مطرح می‌شود. موارد مختلفی برای جلوگیری و کاهش ترک‌های خستگی وجود دارد مانند یکنواختی و صیقلی بودن سطح نمونه که موجب افزایش طول عمر خستگی می‌شود، نحوه تغییرات تنش به عنوان مثال هنگامی که تنش در هر نقطه بین تنش حداکثر و حداقل تغییر می‌کند، بیشترین احتمال خستگی وجود دارد. اما در حالتی که تنش در قطعه بین صفر و تنش حداکثر تغییر می‌کند کمترین احتمال خستگی وجود دارد، که علت آن کاهش دامنه تنش است. مورد دیگر کاهش نقاط بحرانی در طراحی مانند گوشه‌های تیز، سوراخ‌ها، تغییرات مقطع و ... است. با در نظر گرفتن این موارد می‌توان توسعه ترک خستگی را کنترل نمود [۱].

## ۱. لزوم انجام تحقیق

فولادهای با استحکام کشتی بالا کاربرد گسترده‌ای در صنایع کشتی‌سازی، ساخت جرثقیل‌ها و مخازن دارند و برای ساخت اتصالات جوشکاری شده از این فولادها، غالباً از فرآیند جوشکاری الکترو دستی، که یکی از متداول‌ترین فرآیندهای جوشکاری مورد استفاده در کشور ما می‌باشد، استفاده می‌گردد. به دلیل آنکه این فرآیند جوشکاری به صورت دستی انجام می‌شود، لذا تداوم در برقراری پیوسته قوس به دلایلی مانند تمام شدن الکترو، خستگی دست جوشکار و ... امکان پذیر نبوده و جلوگیری از وجود نقاط توقف و شروع دوباره قوس در منطقه‌ی جوشکاری شده اجتناب ناپذیر است. نقاط توقف و شروع قوس می‌تواند بر حسب شکل هندسی و یا ساختار متالورژیکی، به ترتیب جزء عیوب هندسی و یا ساختاری طبقه بندی شوند. علیرغم اینکه تا امروز، اثر عیوب مختلف نظیر تخلخل، عدم نفوذ، بریدگی کناره‌ی جوش و حد پذیرش آن‌ها بر روی پدیده‌ی خستگی مورد بررسی جامعی قرار گرفته و استانداردهای مربوط به آن تدوین شده است، اما تاکنون اثر تغییرات ساختاری نقاط توقف و شروع قوس در قطعات جوشکاری شده بر روی شکست خستگی مورد بحث و بررسی قرار نگرفته است. در تحقیق حاضر سعی بر آن است تا با انجام آزمایش خستگی و بررسی سختی سنجی بر روی نقاط توقف و شروع قوس نمونه‌های جوشکاری شده فولاد ASTM A633-D، اثر تغییرات ساختاری نقاط توقف و شروع قوس بر استحکام خستگی این نمونه‌ها بررسی گردد.

## ۲. مروری بر منابع

### ۱-۲. رشد ترک خستگی

مرحله جوانه زنی به تشکیل ریز ترک‌های سطحی می‌انجامد. این ریز ترک‌ها در امتداد صفحات لغزش فعال قرار می‌گیرند، یعنی در امتداد صفحات لغزشی که تنش برشی بیشترین مقدار را دارد و با افزایش طول ترک، ترک‌های در حال رشد صفحات اولیه لغزش که جهت تنش زاویه‌ی ۴۵ درجه دارند را ترک کرده و تمایل پیدا می‌کنند که در جهت عمود بر محور تنش پیش بروند. این انتقال از صفحه‌ی انتقال از صفحه‌ی لغزش فعال به صفحه‌ی عمود بر محور تنش را غالباً گذر از مرحله I (رشد

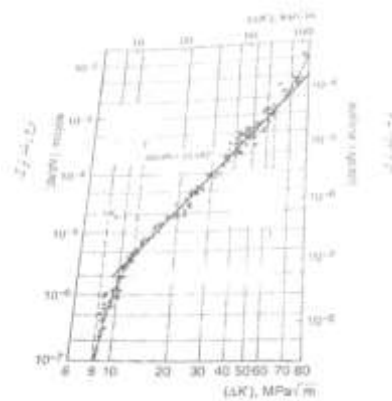
کریستالوگرافی) به مرحله II (رشد غیر کریستالوگرافی) می گویند. آهنگ اشاعه و رشد ترک  $da/dN$  از معادله ی پاریس پیروی می کند [۲].

$$\frac{da}{dN} = A(\Delta K)^P \quad (1)$$

$P$  در این رابطه تجربی شیب منحنی و  $A$  مقدار حاصل از امتداد خط مستقیم تا  $\Delta K = 1 MPam^{1/2}$  است. مقدار  $P$  برای فولادها تقریباً ۳ و برای آلیاژهای آلومینیوم بین ۳ تا ۴ است. معادله ی (۱) اغلب به قانون پاریس مرسوم است [۲].

ناحیه ی III ناحیه ی رشد ترک سریع است. در این ناحیه  $k_{max}$  به سمت  $k_c$  یا چقرمگی شکست ماده میل می کند. با افزایش تنش میانگین در چرخه ی خستگی ( $R = \sigma_{min}/\sigma_{max} = k_{min}/k_{max}$ ) تمایل به افزایش آهنگ رشد ترک در همه ی بخش های منحنی  $K$  شکل زیاد می شود. به طور کلی اثر افزایش  $R$  در ناحیه II کمتر از نواحی I و III است. [۲]

خواص خستگی فلزات به ساختار میکروسکوپی مرتبط هستند. ولی، در حال حاضر تعداد روش هایی که این ارتباط را تعریف می کنند، محدود است. لذا بیشترین بهبود در عمر خستگی از تغییرات در طراحی که موجب کاهش تمرکز تنش و نیز استفاده از تنش های فشاری مورد بررسی قرار می گیرد، چون با ایجاد این تنش ها جوانه زنی ترک به تعویض خواهد افتاد. با این حال بعضی از عوامل متالورژیکی مانند ریزساختار، نابجایی ها و ... را باید در نظر گرفت تا فلز یا آلیاژ مورد نظر بهترین عملکرد را داشته باشد. شکل ۱ نشان می دهد که با افزایش ضریب شدت تنش که حاصل از ساختارهای نامطلوب مانند مارتزیت، طراحی نامناسب و ... می باشد، نرخ رشد ترک افزایش می یابد [۵].



شکل ۱. رابطه ضریب شدت تنش و نرخ رشد ترک [۲].

## ۲-۲. خستگی اتصالات جوشکاری شده

منطقه جوش اکثر اوقات محل اصلی شکست حاصل از خستگی می باشند. جوشکتری خود یک روند پیچیده می باشد که ممکن است منجر به یک محدوده ی وسیع از مقاومت خستگی گردد. کیفیت کار، طراحی صحیح و کاهش عیوب به همراه ایجاد ساختارهایی با خواص مکانیکی بالا می تواند مقاومت خستگی قطعات جوش خورده را تعیین می کند. طراحی و فراوری دقیق جوش می تواند باعث ایجاد استحکام خستگی یکسانی با قطعه آهنگری و ماشین کاری شده از همان نمونه و با هزینه ی خیلی کمتر گردد [۳].

خصوصیت اصلی اتصالات جوش تحت بارگذاری سیکلی، غلبه بر گسترش ترک خستگی است. ترک های خستگی عموماً از سطح جوانه زده و به سمت داخل قطعه رشد می کنند اما مواردی هم مشاهده شده که ترک از داخل منطقه جوش شروع شده و به سمت سطح قطعه رشد نموده است. در حالت اول علت ترک وجود عیوب طراحی و جوشکاری قطعه است و در حالت دوم وجود عیوب متالورژیکی و ریزساختاری که باعث ایجاد ترک های ناشی از سختی بالا، حضور هیدروژن و ناخالصی های غیر فلزی که موجب تشکیل ترک می و شند. حالت دوم زمانی رخ می دهد که تمامی پارامترهای مربوط به طراحی، شکل ظاهری جوش و مونتاژ قطعات درست باشد و عامل تمرکز تنش در مجموعه وجود نداشته باشد [۱].

قطعات جوشکاری شده به علت ناپیوستگی های ریز و درشت، تنش های پسماند و نامیزانی احتمالی، دارای مشکلاتی می باشند که هر کدام ممکن است مابین قطعات ظاهراً یکسان تفاوت ایجاد کنند [۳].

## ۲-۱. عوامل موثر بر مقاومت خستگی

### ➤ تمرکز تنش

در هر اتصال جوشکاری، ترک خستگی از منطقه ای که بیشترین شدت تنش را دارد آغاز می شود و تمرکز تنش در سازه های جوشکاری ممکن است در مقیاس های مختلفی مشاهده شود. این موارد را می توان در دسته های زیر تقسیم بندی کرد:

- موارد مربوط به تغییرات هندسه ی قطعات جوشکاری شده
- موارد مربوط به شکل پروفیل جوش
- موارد مربوط به عیوب میکروسکوپی ناشی از جوش ها

تغییرات هندسی که تمرکز تنش شدیدی ایجاد می کند می تواند توسط طراحی مناسب حذف شده و در نتیجه تمرکز به حداقل میزان ممکن تقلیل یابد. به عنوان مثال تغییر سطح مقطع، تمرکز تنشی ایجاد می کند که می توان آن را با کاهش تدریجی صفحات در ورق ضخیم تر کاهش داد. همچنین شعاع داده به گوشه ها می تواند در کاهش میزان تمرکز تنش موثر باشد [۴].

### ➤ طرح اتصال

طراحی سازه های جوش که متاثر باز بارگذاری خستگی هستند، در مقایسه با طراحی استاتیکی آنها دارای پیچیدگی بیشتری بوده و بررسی عمیق تری را نیاز دارد. مهم ترین مسئله در این رابطه انتخاب استحکام خستگی مناسب جهت استفاده در محاسبات مربوط به شکل و ابعاد قطعات مورد نظر میباشد. استحکام خستگی در اتصالات جوش به عوامل متعددی از قبیل: ابعاد پروفیل جوش، نوع و جهت بارگذاری، شرایط محیطی و طول عمر مورد نیاز بستگی دارد.

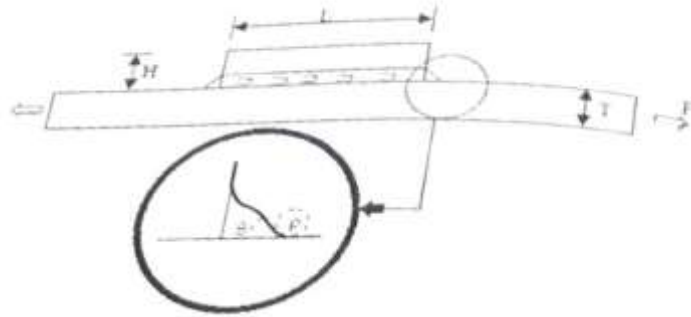
در اغلب کشورها استحکام خستگی مجاز در رابطه با اتصالات مختلف جوش استاندارد شده است. در این استانداردها، اتصالات جوش طبقه بندی شده و بسته به شکل آنها و جهت بارگذاری در کلاس های مختلفی قرار می گیرند. برای هر کلاس یک منحنی S-N وجود دارد که طراحی اتصال بر اساس آن صورت می گیرد [۵].

### ➤ پروفیل جوش

مشخص شده است که شکل گرده ی جوش بر فاکتور تمرکز تنش در پنجه ی جوش<sup>۱</sup> تاثیرگذار است. بنابراین انتظار جوانه زنی و رشد ترک های خستگی از پنجه ی جوش می رود. در نتیجه بسیاری از مطالعات اخیر در جهت بهبود عمر خستگی بر اصلاح پروفیل جوش متمرکز است. در شکل ۲ موقعیت شعاع و زاویه ی پنجه ی جوش را به صورت شماتیک ارائه می دهد.

<sup>1</sup> Weld Toe

مطالعات نشان داده است که شعاع پنجه ی جوش نسبت به زاویه ی پنجه ی جوش تاثیر بیشتری بر روی عمر خستگی دارد، این امر را می توان در روابط (۲) و (۳) که رابطه بین میزان تمرکز تنش با زاویه و شعاع پنجه ی جوش است به خوبی مشاهده نمود [۵].



شکل ۲. تصویر شماتیک شعاع و زاویه ی پنجه ی جوش [۲]

$$K_w = 1 + 0.27(\tan\theta)^{0.25} \left(\frac{T}{\rho}\right)^{0.5} \quad (2)$$

$$K_w = 1 + 0.51(\tan\theta)^{0.25} \left(\frac{T}{\rho}\right)^{0.47} \quad (3)$$

معادله (۲) مربوط به جو سر به سر و معادله (۳) مربوط به جوش نبشی است. در این معادلات  $K_w$  تمرکز تنش پنجه ی جوش،  $\theta$

زاویه پنجه ی جوش،  $\rho$  شعاع پنجه ی جوش و  $T$  ضخامت ورق می باشد [۵]. همان گونه که مشاهده می شود در این رابطه با افزایش زاویه پنجه ی جوش میزان تمرکز تنش پنجه ی جوش افزایش می یابد و نیز ضخامت ورق و شعاع پنجه ی جوش با تمرکز تنش پنجه ی جوش رابطه مستقیم داشته و تاثیرشان بیشتر از زاویه ی پنجه ی جوش می باشد.

در اتصالات جوش می توان تمرکز تنش را در پنجه ی جوش به صورت موضعی کاهش داد. به عنوان مثال، با سنگ زدن گرده ی جوش در اتصالات سر به سر می توان تمرکز تنش را کاهش داد و لذا با مسطح کردن سطح گرده ی جوش می توان استحکام خستگی را تا حد استحکام خستگی فلز پایه افزایش داد. علت این امر از روابط (۲) و (۳) مشخص است با انجام عملیات سنگ زنی گرده ی جوش،  $\theta$  کاهش می یابد که باعث کاهش مقدار تمرکز تنش  $K_w$  می گردد.

### ۳. روش پژوهش

#### ۳-۱. مواد مصرفی

در این تحقیق از ورق های فولادی کربنی استحکام بالا از نوع فولاد کم آلیاژ ASTM A633-D به ضخامت ۱۵ میلی متر استفاده گردید که ترکیب شیمیایی آن در جدول ۱ ارائه شده است. سیم جوش مورد مصرف جهت جوشکاری نیز از نوع E8018-C3-H4 بوده است که ترکیب شیمیایی آن هم در جدول ۲ ارائه گردیده است.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی فولاد ASTM A633-D بر حسب درصد وزنی

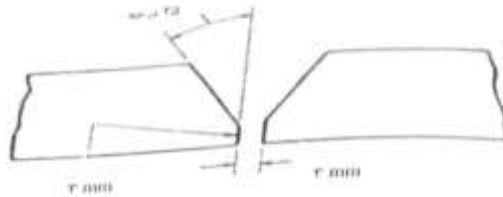
| Ni   | Cr   | P     | Si   | Mn  | C     |
|------|------|-------|------|-----|-------|
| ۰/۲۵ | ۰/۲۵ | ۰/۰۰۵ | ۰/۲۵ | ۱/۵ | ۰/۰۳۶ |

جدول ۲. ترکیب شیمیایی سیم جوش بر حسب درصد وزنی

| P    | Cu   | Al  | S    | Mn   | Si   | C    |
|------|------|-----|------|------|------|------|
| ۰/۰۷ | ۰/۸۲ | ۱۲۰ | ۰/۰۳ | ۱/۴۱ | ۰/۸۲ | ۰/۰۷ |

### ۳-۲. آماده سازی

با توجه به کد ASME Sec IX و اینکه طرح اتصال جزو متغیرهای غیر اساسی می باشد، جهت ایجاد طرح اتصال مناسب از استاندارد ISO9692 استفاده شد. با استفاده از دستگاه برش اکسی استیلن اتوماتیک، تعداد ۴ عدد نمونه از ورق فولادی ASTM A633-D به ابعاد  $15 \times 30 \times 15$  میلی متر تهیه گردید و سپس با استفاده از دستگاه پخ زن، طرح اتصال مناسب ایجاد شد که تصویر شماتیک آن در شکل ۳ ارائه شده است. پس از آن مناطق معینی بر روی ورق ها علامت گذاری شد که در آن ها قوس باید به طور عمدی قطع و دوباره قرار می شد. قبل از جوشکاری نمونه ها، الکترودها به مدت دو ساعت در کوزه تا دمای  $350^\circ$  درجه سانتی گراد گرم شدند.



شکل ۳. تصویر شماتیک طرح اتصال

### ۳-۳. جوشکاری و برشکاری نمونه ها

ورق های تهیه شده به صورت طرح اتصال جناغی یک طرفه، پس از قرار گرفتن در فیکسچر توسط دستگاه جوشکاری الکترو دستی با شرایط یکسان جوشکاری از نظر آمپر، ولتاژ و سرعت جوشکاری (حرارت های ورودی یکسان) جوشکاری گردیدند. بر روی ورق های نقاطی که از قبل علامت گذاری شده بود، قوس قطع و سپس دوباره برقرار شد. پارامترهای جوشکاری برای نقاطی که در آن ها قوس به طور پیوسته برقرار بود، طبق جدول ۳ اندازه گیری گردید، در حالیکه در نقاط توقف و شروع دوباره قوس پارامترهای جوشکاری بر اساس بود. از ورق های جوشکاری شده (شکل ۴) نمونه هایی از نقاط مختلف توسط اهر مغناطیسی بریده شدند.

جدول ۳. مشخصات جوشکاری در حالت تداوم قوس

| سرعت (cm/min) | ولتاژ | آمپر |           |
|---------------|-------|------|-----------|
| ۸/۱۴          | ۲۲-۲۶ | ۱۲۲  | پاس اول   |
| ۷/۶۳          | ۲۱-۲۳ | ۱۲۲  | پاس دوم   |
| ۸/۱۴          | ۲۱-۲۵ | ۱۲۲  | پاس سوم   |
| ۷/۶۵          | ۲۱-۲۶ | ۱۲۲  | پاس چهارم |
| ۸/۰۲          | ۲۱-۲۶ | ۱۲۲  | پاس پنجم  |

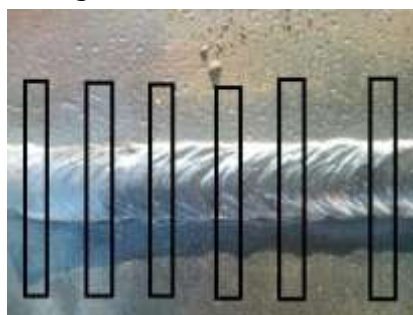
جدول ۵. مشخصات جوشکاری در نقاط توقف و شروع قوس

| ولتاژ (V) | آمپر (A) |           |
|-----------|----------|-----------|
| ۱۹        | ۱۲۵      | پاس اول   |
| ۱۷        | ۱۲۵      | پاس دوم   |
| ۱۹        | ۱۲۸      | پاس سوم   |
| ۱۹        | ۱۲۵      | پاس چهارم |
| ۱۹        | ۱۲۵      | پاس پنجم  |



شکل ۴. تصویر قطعه‌ی جوشکاری شده

پس از جوشکاری نمونه‌ها، از نقاط علامت گذاری شده بر روی ورق‌های جوشکاری، به منظور توقف و شروع دوباره قوس، نمونه‌هایی توسط اهر مغناطیسی برشکاری شد. همچنین از نقاطی که قوس پیوسته برقرار بود نمونه‌هایی برشکاری شد. مطابق شکل ۵ این نمونه‌ها از نقاط تداوم قوس و نقاطی که قوس متوقف و دوباره شروع شده، تهیه شد.



شکل ۵. نحوه‌ی برشکاری نمونه‌ها

### ۳-۴. آزمون‌ها

#### ۳-۴-۱. آزمایش خستگی کم دامنه

همه آزمایشات خستگی تحت بارگذاری محوری مستقیم در دستگاه آزمایش خستگی سروویدرولیک تحت کنترل بار و در دمای محیط (تقریباً ۲۰ درجه سانتیگراد) انجام شد. نمونه‌های A و B توسط دستگاه آزمایش خستگی Instron مدل ۸۵۰۲ به صورت کشش - فشار تحت بارگذاری قرار گرفتند. با توجه به استحکام نهایی هر کدام از نمونه‌های A و B حداکثر نیروی اعمالی به آنها مشخص شد. سیکل خستگی نیز با توجه به استاندارد ASTM E466 به صورت حداکثر و حداقل آن برابر حداقل بود در نظر گرفته شد.

#### ۳-۴-۲. آزمون سختی سنجی

توسط دستگاه Wolpert Viestor با نیروی ۲۵ گرم نیرو به روش ویکرز بر روی نمونه‌ی پولیش شده در مناطق فلز پایه و فلز جوش، جهت افزایش دقت نتایج در هر ناحیه، حداقل ۵ بار آزمون منحنی انجام پذیرفت که متوسط نتایج آنها معیار سختی سنجی قرار گرفت.



شکل ۶. دستگاه معیارسنجی سختی

#### ۴. نتایج و بحث

##### ۴-۱. آزمون خستگی

آزمون خستگی به صورت کشش- فشار در فرکانس ۳ هرتز و  $R=-1$  بر روی ۸ نمونه از نمونه های A و ۷ نمونه از نمونه های B انجام شد. بر طبق جدول ۳ با اعمال تنش های مشخص، تعداد سیکل ها تا شکست نهایی نمونه ی متناظر با هر تنش ثبت شد.

جدول ۳. نتایج آزمون خستگی

| نمونه ی B |            | نمونه ی A |            |
|-----------|------------|-----------|------------|
| تنش (MPa) | تعداد سیکل | تنش (MPa) | تعداد سیکل |
| ۳۰۰       | ۱۱۰۳۵۴     | -         | -          |
| ۳۵۰       | ۲۲۳۷۰      | ۳۵۰       | ۹۸۵۲۰      |
| ۳۷۵       | ۱۲۱۵۰      | ۳۷۵       | ۲۹۸۵۶      |
| ۴۰۰       | ۶۵۸۹       | ۴۵۰       | ۶۸۹۱       |
| ۵۰۰       | ۲۲۴۵       | ۵۰۰       | ۳۵۶۲       |
| ۵۴۰       | ۱۶۳        | ۵۴۰       | ۳۸۲        |

از آنجایی که در سازه های جوشکاری شده به دلیل وجود ساختارهای ناهمگن و سخت که مستعد ترک و تنش های کششی اضافی، در محل وقوع شکست منطقه جوش می باشد، لذا در آزمون های خستگی انجام شده، کلیه ی نمونه ها با زاویه مایل و از منطقه جوش دچار ترک و شکست شد (شکل ۷)

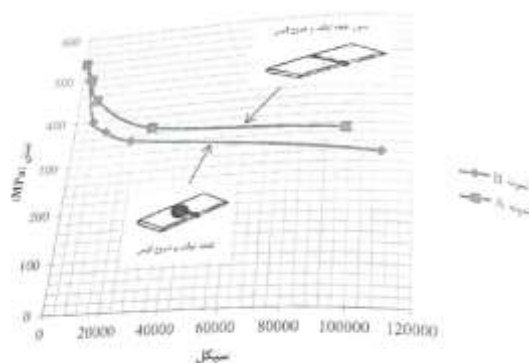


شکل ۷. نمونه ی شکست خستگی

همان طور که در شکل ۸ مشاهده می شود، در این آزمایش نمونه های A از استحکام خستگی بهتری نسبت به نمونه های B برخوردار بودند.

استحکام خستگی یک اتصال جوشکاری شده مستقل از استحکام کششی ماده است. علیرغم اینکه افزایش استحکام کششی در فولادها سبب افزایش استحکام خستگی آنها می شود، در اتصالات جوشکاری شده به دلیل مکانیزم پیچیده و سیکل حرارتی، افزایش استحکام کششی الزاماً سبب افزایش استحکام خستگی نمی شود. برای جوش ها با توجه به وجود عیوب میکروسکوپی اجتناب ناپذیر و تغییرات ساختار، افزایش استحکام مکانیکی تاثیر چندانی در بهبود خواص خستگی ندارد.





شکل ۸. نمودار مقایسه‌ی نتایج خستگی

#### ۲-۴. سختی

#### ۱-۲-۴. سختی فلز پایه و فلز جوش در نمونه B

عملیات سختی سنجی با اعمال نیروی ۵ کیلوگرم نیرو و زمان ۱۰ ثانیه بر روی فلز پایه و فلز جوش در پاس‌های مختلف در نمونه B انجام شد. نتایج عملیات سختی سنجی در جدول ۴ آمده است. این نتایج نشان می‌دهد که با توجه به عملیات حرارتی جوش، در لایه‌های بالاتر جوش که در آنها تبلور مجدد انجام شده، نوع ساختار تغییر کرده و سختی در لایه‌های بالاتر کاهش پیدا کرده است.

جدول ۴. سختی فلز پایه و فلز جوش در نمونه B

| سختی ویکرز (HV) |           |
|-----------------|-----------|
| ۳۲۰             | فلز پایه  |
| ۴۷۶             | پاس اول   |
| ۴۵۱             | پاس دوم   |
| ۴۰۵             | پاس سوم   |
| ۴۱۲             | پاس چهارم |
| ۴۲۴             | پاس پنجم  |

به نظر می‌رسد که در پاس اول و دوم به دلیل امتزاج و عملیات حرارتی پاس‌های قبلی با فلز پایه سختی افزایش یافته اما به دلیل امتزاج کمتر با فلز پایه در پاس سوم و چهارم و همچنین تحت تاثیر عملیات حرارتی متفاوتی قرار گرفته اند، دارای ساختار متفاوتی بوده و سختی پاس سوم کاهش یافته است و در پاس چهارم سختی افزایش یافته است.

#### ۲-۲-۴. سختی ناحیه‌ی شکست در نمونه‌های A و B

برای نمونه‌های شکست، سختی سنجی با اعمال نیروی ۲۵ گرم نیرو و زمان ۵ ثانیه با بزرگنمایی ۴۰۰ در محل شکست انجام شد. در هر نمونه میانگین ۵ نقطه سختی سنجی در جدول ۵ ذکر گردیده است.

جدول ۵. نتایج سختی در ناحیه‌ی شکست نمونه‌های A و B

| سختی ویکرز (HV) |         |
|-----------------|---------|
| ۲۲۱             | نمونه A |
| ۲۴۳             | نمونه B |

مقایسه ی این نتایج نشان می دهد که در سطح شکست نمونه ی B، سختی بیشتر از نمونه ی A بوده است که این نتایج با نتایج به دست آمده از تست کشش هم مطابقت می کند. نتایج آزمون متالوگرافی نشان داد که ساختار در نمونه ی B به صورت فریت دانه درشت و فریت ویدمن اشتاتن بوده که این امر همان طور که از جدول ۵ پیداست، بر روی سختی نمونه ی B تاثیر گذاشته و سبب افزایش استحکام کششی در این نمونه شده است.

#### ۵. نتیجه گیری

۱. سختی در ناحیه شکست نقاط توقف و شروع قوس نسبت به نقاطی که در آن ها قوس پیوست برقرار است، بیشتر می باشد.
۲. افزایش سختی در مناطق توقف و شروع قوس، سبب افزایش استحکام کششی در این نقاط می شود.
۳. در نمونه های چند پاس، حرارت حاصل از جوشکاری پاس رویه بر روی پاس های زیرین، حکم فرآیند تمپر را ایفا نموده است و موجب تبلور مجدد و ریزدانه شدن ساختار گردیده است.
۴. در کنار کاهش اندازه ی دانه، همگن شده ساختار و کاهش درصد فریت ویدمن اشتاتن به عنوان مسیر مرجع برای رشد ترک خستگی، عمر خستگی در نمونه هایی که قوس پیوسته برقرار بوده است افزایش می یابد.

#### ۱-۵. پیشنهادات برای تحقیقات آتی

- مقایسه ی استحکام خستگی در نقاط توقف و شروع قوس در جوش فولاد زنگ نزن با فرآیندهای GTAE, FSW, EBW
- بررسی تاثیر عملیات حرارتی بر استحکام خستگی نقاط توقف و شروع قوس در جوش نبشی.
- بررسی حد پذیرش عیوب ساختاری و متالورژیکی در شکست خستگی

#### منابع

- [1] Kirkhope, K.J., Bell, R., Caron, L. and Basu, R.I.; "Weld Detail Fatigue Life Improvement Techniques", Ship Structure Committee, p.p. 6-110, 1997.
- [۲] اکرامی، علی اکبر؛ خستگی فلزات، مرکز نشر دانشگاهی، صفحات ۱۵-۴۳، ۱۳۸۰.
- [۳] موسوی ترشیزی، سید ابراهیم؛ خستگی فلزات در مهندسی، پژوهشگاه نیرو، صفحات ۵۷۹-۵۸۵، ۱۳۸۹.
- [۴] رفتار سازه های جوشکاری تحت بارگذاری دینامیک، مرکز پژوهش و مهندسی جوش ایران، مجموعه .
- [۵] Lassen, T., Recho, N.; "Fatigue Life Analysis of Welded Structure", WILEY, p.p. 11-193, 2008.