

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

حمید محمدی مزرعه^۱، غلامرضا خیاطی^۲

^۱ گروه مهندسی مواد جوشکاری واحد بندرعباس، دانشگاه آزاد اسلامی، بندرعباس، ایران

^۲ استادیار-مهندسی مواد و متالورژی-دانشگاه شیراز (نویسنده مسئول)

چکیده

در این تحقیق آزمون خستگی و شکست نگاری کم چرخه در مناطق پیوسته جوشکاری انجام شده 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 خستگی تحت سیکل کم و همچنین شکست نگاری بر روی نمونه ها انجام پذیرفت. نتایج حاصله نشان می دهد که سیکل حرارتی جوشکاری نامناسب باعث ایجاد ساختار فریت دانه درشت و فریت ویدمن اشتاتن در نقاط توقف و شروع قوس گردیده است. در نقاط توقف و شروع قوس به دلیل ایجاد ساختارهای فریت مرزدانه ای درشت، آخال و تخلخل پدیده آغاز ترک تشدید گردیده و ایجاد ساختارهای فریت ویدمن اشتاتن باعث تسریع در رشد ترک شده است. نتایج نشان دهنده کاهش استحکام در این نمونه ها می باشد. اگر چه در این نقاط سختی و استحکام کششی بیشتر از نمونه هایی است که قوس پیوسته برقرار بوده است.

واژه های کلیدی: جوش لب به لب قوس الکتریک، شکست نگاری، فولاد کم آلیاژ، نقاط توقف و شروع قوس.

مقدمه

در پدیده ی خستگی، شکست از تنش کششی و یا برشی ناشی می شود، به عبارتی ترک ها به عنوان عامل افزایش تنش موضعی عمل می کنند که نتیجه این امر رشد ترک است. جسم تا زمانی در برابر بار اعمالی مقاومت می کند که سطح مقطع باقی مانده از جسم توان تحمل بار اعمالی را داشته باشد. یکی از راهکارهای عملی که موجب کاهش سرعت رشد ترک تا رسیدن به طول بحرانی آن می شود کاهش تمرکز تنش در لبه های ترک است (لاسن و رکو، ۲۰۰۸).

موارد مختلفی برای جلوگیری و کاهش ترک های خستگی وجود دارد مانند یکنواختی و صیقلی بودن سطح نمونه که موجب افزایش طول عمر خستگی می شود، نحوه تغییرات تنش به عنوان مثال هنگامی که تنش در هر نقطه بین تنش حداکثر و حداقل تغییر می کند، بیشترین احتمال خستگی وجود دارد؛ اما در حالتی که تنش در قطعه بین صفر و تنش حداکثر تغییر می کند کمترین احتمال خستگی وجود دارد که علت آن کاهش دامنه تنش است. مورد دیگر کاهش نقاط بحرانی در طراحی مانند گوشه های تیز، سوراخ ها، تغییرات مقطع و ... است. با در نظر گرفتن این موارد می توان توسعه ترک خستگی را کنترل نمود (کیرخوپ^۱، ۱۹۹۷).

فولاد استحکام کششی بالا نسبت به فولاد کربنی ساده مقاومت به خستگی بالاتری دارد، از این فولادها در صنایع دریایی، به منظور ساخت بدنه ی فشار زیر دریایی، ساخت جرثقیل های بزرگ و در صنایع نفت و گاز برای ساخت لوله ها و مخازن تحت فشار و ... استفاده می شود. از آن جایی که شرایط کاری سازه های دریایی عمدتاً در دمای پایین می باشد، لذا این سازه ها به شکست ترد حساس بوده و گزارش ها حاکی از آن است که منشأ ترک که باعث این شکست می شود، از منطقه ی جوش جوانه زده و در فلز جوش یا منطقه ی متأثر از حرارت رشد می کند. علاوه بر این سازه های دریایی تحت تاثیر نیروهای هیدرودینامیکی ناشی از تلاطم آب قرار دارند، لذا بحث خستگی روی این سازه ها مطرح می شود.

در فرآیند جوشکاری نقایص مکانیکی، متالورژیکی و تغییرات ساختاری که از جمله ی آن ها می توان نقاط شروع / توقف، انتهای جوش ها و حتی محل های برخورد قوس با فلز پایه را نام برد که می توانند محل های مناسبی برای جوانه زنی و رشد ترک های خستگی باشند.

۱. لزوم انجام تحقیق

نقاط توقف و شروع قوس می توانند 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 کناره ی جوش و حد پذیرش آن ها بر روی پدیده ی 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 شکست نگاری بررسی های ساختاری و سختی سنجی بر روی نقاط توقف و شروع قوس نمونه های جوشکاری شده فولاد ASTM A633-D، اثر تغییرات ساختاری نقاط توقف و شروع قوس بر استحکام خستگی این نمونه ها بررسی گردد.

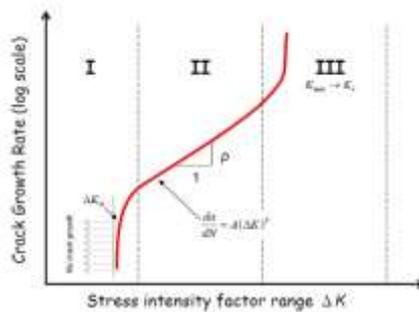
۲. مروری بر منابع**۲-۱. مشخصات خستگی**

در مطالعه تغییرات ساختاری فلزی که به آن تنش تناوبی اعمال می شود، فرآیند خستگی برای سهولت درک به مراحل زیر تقسیم می شود (جورج، ۱۳۸۱)

(۱) جوانه زنی ترک: شامل ایجاد ترک در فلز مورد نظر

¹ Kirkhope

- (۲) رشد ترک روی نوار لغزش: عبارت است از عمیق شدن ترک اولیه روی صفحات با تنش بررسی حداکثر که غالباً رشد ترک مرحله I نامیده می شود.
- (۳) رشد ترک روی صفحاتی با تنش کششی حداکثر: عبارت است از رشد یک ترک معین در جهت عمود بر تنش کششی حداکثر که معمولاً رشد ترک مرحله II نامیده می شود.
- (۴) شکست نهایی: شکست نهایی هنگامی رخ می دهد که طول ترک به اندازه ای برسد که سطح مقطع باقی مانده توانایی تحمل بار اعمالی را نداشته باشد. این ناحیه مرحله III نامیده می شود که از ریز ساختار، تنش میانگین، ضخامت و درصد کمتری هم از محیط تاثیرپذیر است (ASM, 2005). شکل ۱ مراحل مختلف رشد و شکست خستگی را بر اساس تعداد سیکل های اعمالی نشان می دهد.



شکل ۱. سه ناحیه ی اصلی خستگی (ASM, 2005)

۲-۲. طبقه بندی انواع خستگی

خستگی براساس تعداد سیکل منجر به شکست به دو دسته عمده طبقه بندی می شود.

الف) خستگی تحت سیکل های کم^{۲۱}

ب) خستگی تحت سیکل های زیاد^۳

۲-۲-۱. خستگی تحت سیکل های کم

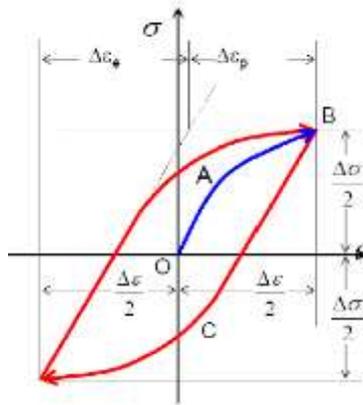
با اینکه اساساً مطالعات خستگی به شرایط کاری که در آن شکست در بیش از $A \times 10^4$ سیکل تنش رخ می دهد مربوط است. دیده شده است که برخی شکست های مهندسی در تنش های نسبتاً زیاد و تعداد سیکل کم رخ می دهد. در این نوع شکست خستگی به دلیل تنش زیاد، جوانه زنی و رشد ترک بسیار سریع تر صورت می پذیرد و شکست در تعداد سیکل های کمتر اتفاق می افتد که به آن خستگی کم دامنه گفته می شود. این نوع شکست خستگی در طراحی رآکتورهای هسته ای، سازه های دریایی و انواع ماشین آلات مولد نیرو مورد توجه قرار می گیرد (لیانگین، اکرامی، ۱۳۸۵).

اغلب شرایط حاکم بر خستگی در سیکل های کم در جایی به وجود می آید که تنش های تناوبی منشأ حرارتی یا تنش بالا داشته باشند. از آنجایی که تنش های بالا باعث تغییر شکل قطعه می شوند، مشاهده می شود که در این حالت خستگی به جای آنکه در اثر تنش های سیکلی به وجود آید، از کرنش های سیکلی ناشی می شود.

¹ Lassen and Recho

² Low cycle Fatigue (LCF)

³ High cycle Fatigue (HCF)



شکل ۲. حلقه ی تنش - کرنش در چرخه ی کرنش ثابت (اکرامی، ۱۳۸۵).

شکل ۲ یک حلقه تنش-کرنش را تحت سیکل کرنش ثابت کنترل شده ای در یک آزمایش خستگی تحت سیکل های کم نشان می دهد (کوکبی، ۱۳۸۳ و میلر و مکید^۱، ۲۰۰۲). منحنی تنش-کرنش هنگام بارگذاری اولیه O-A-B است. در اثر فشار به دلیل پدیده باوشینگر، تسلیم در تنش کمتر C رخ میدهد. در بارگذاری مجدد در حالت کشش یک حلقه پسماند ایجاد می شود. ابعاد این حلقه توسط عرض آن $\Delta\varepsilon$ ، یعنی دامنه ی کل کرنش و ارتفاع آن $\Delta\sigma$ ، یعنی دامنه ی کل تنش، مشخص می شد. دامنه ی کل کرنش $\Delta\varepsilon$ شامل یک مولفه کرنش الاستیک به میزان $\Delta\varepsilon = \Delta\sigma/E$ به همراه یک مولفه کرنش

پلاستیک $\Delta\varepsilon_p$ است (اکرامی، ۱۳۸۵). عرض حلقه پسماند به مقدار کرنش سیکلی بستگی دارد. هنگامی که مقدار کرنش سیکلی کم باشد، حلقه پسماند بسیار باریک می شود. در آزمایش هایی که با $\Delta\varepsilon$ ثابت انجام می شوند، دامنه ی تنش $\Delta\sigma$ معمولاً با افزایش تعداد سیکل ها تغییر می کند. در مواد آنیل شده، کار سختی سیکلی به وجود می آید. به طوری که $\Delta\sigma$ با افزایش تعداد سیکل ها زیاد شده و سپس بعد از گذشت حدود ۱۰۰ سیکل کرنش، ثابت می ماند.

هر چه مقدار $\Delta\varepsilon$ بیشتر شود، افزایش دامنه ی تنش بیشتر خواهد بود. موادی که در ابتدا کار سرو شده اند، تحت کار نرمی سیکلی قرار می گیرند. به طوری که با افزایش تعداد سیکل های کرنش، $\Delta\sigma$ کاهش می یابد.

روش متداولی که برای نشان دادن نتایج آزمایش خستگی تحت سیکل های کم به کار می رود، ترسیم دامنه ی کرنش پلاستیک $\Delta\varepsilon_p$ بر حسب تعداد سیکل تا شکست (N) است. در مقیاس لگاریتمی نتیجه ترسیم دامنه ی کرنش بر حسب تعداد سیکل یک خط مستقیم است. شیب این خط تا حدی به نوع ماده بستگی دارد که مقدار میانگین آن ۰/۵- است. این رفتار قانون کافین-مانسون نامیده می شود که با رابطه (۱) بیان می شود.

$$\frac{\Delta\varepsilon_p}{2} = \varepsilon'_f (2N)^c \quad (1)$$

که در این رابطه

$$\frac{\Delta\varepsilon_p}{2} : \text{دامنه ی کرنش پلاستیک،}$$

¹ Miller and Makid

ϵ_f' : ضریب نرمی خستگی که با مقدار کرنش در $2N=1$ تعریف می شود برای بسیاری از فلزات ϵ_f' معادل مقدار کرنش حقیقی شکست است.

$2N$: تعداد تغییر جهت بارگذاری تا شکست

C : توان نرمی خستگی که برای بسیاری از فلزات بین -0.5 و -0.7 متغیر است.

رابطه (۱) ارتباط میان کرنش پلاستیک و عمر خستگی در سیکل های کم (کرنش بالا) را بیان می کند. برای خستگی در سیکل بالا (کرنش کم) که کرنش های اسمی، در حد الاستیک هستند، معادله ی بسکین^۱ معادله (۲) (اکرامی، ۱۳۸۵) که در مورد رفتار خستگی در سیکل های زیاد صادق است را می توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\sigma_a = \frac{\Delta \epsilon_c}{2} E = \sigma_f' (2N)^b \quad (2)$$

که در آن:

σ_a : دامنه ی تنش تناوبی

$\Delta \epsilon_c / 2$: دامنه ی کرنش الاستیک

E : مدول یانگ و

σ_f' : ضریب استحکام خستگی که از مقدار تنش در $2N=1$ مشخص می شود. σ_f' تقریباً با تنش حقیقی شکست، σ_f معادل است.

$2N$: تعداد تغییر جهت بارگذاری تا شکست (N =تعداد سیکل تا شکست)

b = توان استحکام خستگی که برای اغلب فلزات بین -0.5 و -0.12 متغیر است. مقادیر کوچکتر b منجر به عمر خستگی بیشتر می شود.

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

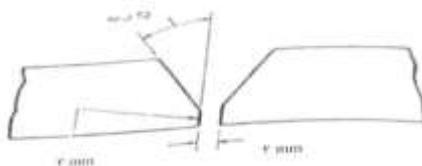
جدول ۲. ترکیب شیمیایی سیم جوش بر حسب درصد وزنی

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

¹ Baskin

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° 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 اره 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

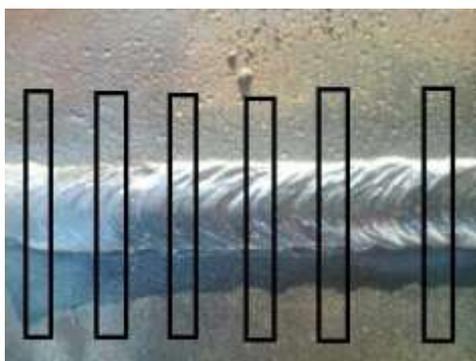
جدول ۴. مشخصات جوشکاری در نقاط توقف و شروع قوس

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 قطعه ی جوشکاری شده

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



شکل ۵. نحوه ی برشکاری نمونه ها

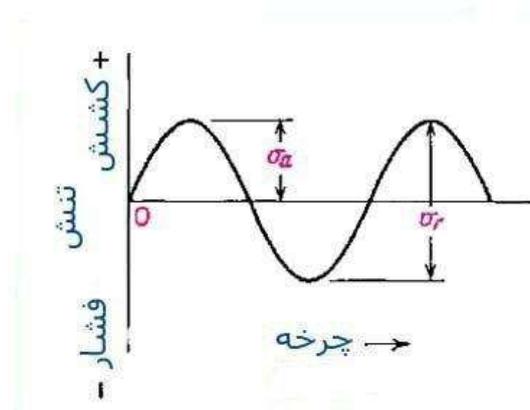
۴-۳. آزمون ها

۳-۴-۱. آزمایش خستگی کم دامنه

همه آزمایشات خستگی تحت بارگذاری محوری مستقیم در دستگاه آزمایش خستگی سروو هیدرولیک تحت کنترل بار و در دمای محیط (تقریباً ۲۰ درجه سانتیگراد) انجام شد. نمونه های A و B توسط دستگاه آزمایش خستگی Instron مدل ۸۵۰۲ (شکل ۶) به صورت کشش- فشار تحت بارگذاری قرار گرفتند که نمودار اعمال نیرو در شکل ۷ ارائه شده است. با توجه به استحکام نهایی هر کدام از نمونه های 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.



شکل ۶. دستگاه تست خستگی Instron مدل ۸۵۰۲



شکل ۷. نمودار اعمال نیرو

شکست در نمونه ها به صورت شکستگی کامل نمونه و یا وقتی که گسترش ترک از یک حد معین تقریباً برابر ۱٪ کرنش تجاوز کند، تعریف می شود.

۳-۴-۲. شکست نگاری توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی

پس از آزمون خستگی جهت بررسی سطوح شکست و نحوه رشد ترک سطح نمونه های شکست توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل XL۳۰ ساخت شرکت PHILIPS، در بزرگنمایی های مختلف و با ولتاژ کاری ۱۵ KV و در حالت الکترون های برگشتی^۱ و الکترون های ثانویه^۲ تحت بررسی های شکست نگاری قرار گرفتند. همچنین سطوح شکست توسط میکروسکوپ عملیاتی WDX=3PC آنالیز شده و درصد عناصر آلیاژی موجود در سطح شکست بررسی گردید.

^۱ Back Scattered Electron (BSE)

^۲ Secondary Election (SE)



شکل ۸. میکروسکوپ الکترونی روبشی

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 ۵ با اعمال تنش های مشخص، تعداد سیکل ها تا شکست نهایی نمونه ی متناظر با هر تنش ثبت شد.

جدول ۵. 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

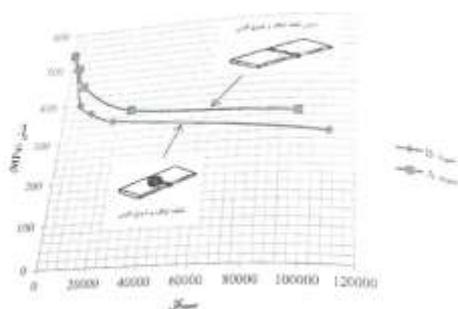
از آنجایی که در سازه های جوشکاری شده به دلیل وجود ساختارهای ناهمگن و سخت که مستعد ترک و تنش های کششی اضافی، در محل وقوع شکست منطقه جوش می باشد، لذا در آزمون های خستگی انجام شده، کلیه ی نمونه ها با زاویه مایل و از منطقه جوش دچار ترک و شکست شد (شکل ۱۱)



شکل ۹. نمونه ی شکست خستگی

همان طور که در شکل ۱۰ 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.

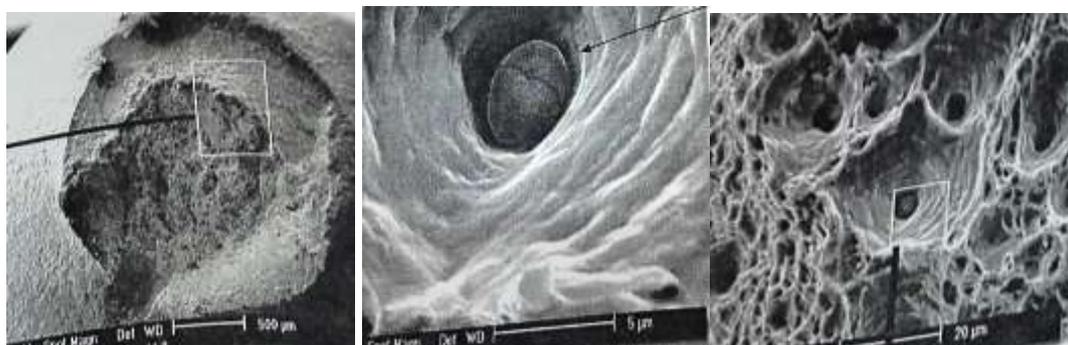


شکل ۱۰. نمودار مقایسه ی نتایج خستگی

۴-۲. شکست نگاری

۴-۲-۱. شکست نگاری از نمونه ی کشش

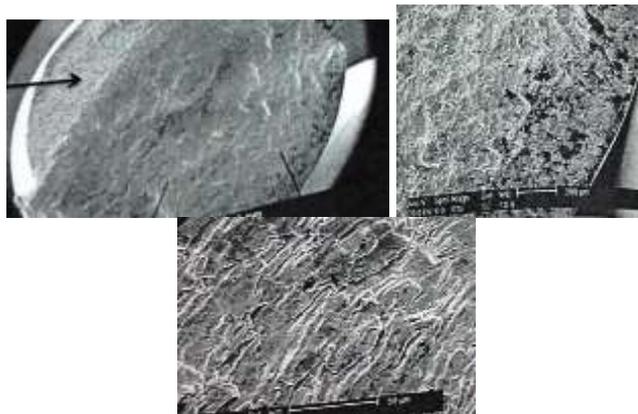
شکست در نمونه های کشش با پدیده ی گلوبی شدن همراه بود و مقاطع شکست به صورت مخروطی در آمد. شکل ۱۱ نمونه ی شکست در تست کشش را نشان می دهد. به دلیل اینکه در سطوح شکست تغییر شکل قابل ملاحظه ای در قبل و در حین پیشروی ترک مشاهده می شود و در سطح مقدار زیادی تغییر شکل وجود دارد، بنابراین شکست به صورت شکست نرم بوده است. ملاحظه می گردد جدایش ذرات رسوبی و یا ناخالصی ها با فلز پایه می توانند باعث گسیختگی نمونه شود. رشد ترک در شکست نرم توسط به هم پیوستن حفره ها انجام می شود که ناخالصی ها و یا ذرات اکسیدی مکان مناسبی برای تشکیل این حفره ها است. همانطور که از شکل ۱۱ پیداست حفره ها تمایل دارند که با شکست ذرات یا جدایش فصل مشترک تشکیل شده و در صفحه ای که عمود بر محور تنش است رشد کنند.



شکل ۱۱. مناطق شکست در نمونه ی کشش

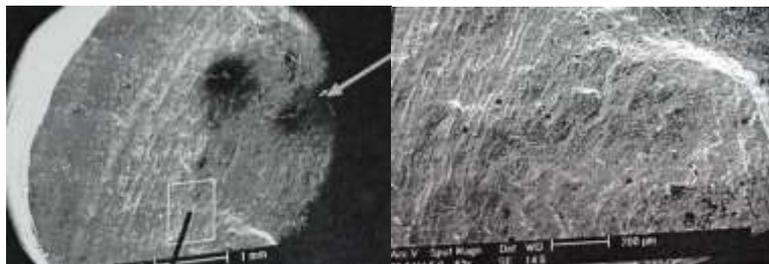
۴-۲-۲. شکست نگاری از نمونه های A و B

شکل ۱۲ سطح شکست خستگی در نمونه ی B را نشان می دهد. همانطور که در شکل مشخص است، سطح شکست از دو ناحیه متمایز تشکیل شده است. ناحیه کوچکتر، روشن و تا حدی زبر، واقع در بالای سطح شکست است که این ناحیه، سطح مقطع باقی مانده در زمان شکست را نشان می دهد. بخش دیگر مقطع، ناحیه ی ترک های خستگی را نشان می دهد. بسیاری از ترک های اولیه را می توان به صورت خطوطی در قسمت پایین سمت راست، حول محیط خارجی مشاهده کرد. این قسمت ناحیه ای است که فرایند ایجاد ترک های اولیه از آنجا آغاز می شود. از آنجا که قطعه در معرض تنش های تناوبی قرار گرفته، این ترک های ریز اولیه رشد کرده و به هم متصل می شوند به طوری که اصولاً یک ترک خستگی حدوداً ۸۰٪ سطح را در بر می گیرد. در منطقه ی اصلی ترک خستگی می توان نوارهای موجی تیره و روشنی را مشاهده کرد که معرف خطوط ساحلی است. این خطوط در نتیجه ی باز و بسته شدن و سایش دو سطح مجاور ترک، در بارگذاری تناوبی و همچنین در نتیجه ی شروع و اتمام رشد ترک در سرعت های مختلف، هنگام بارگذاری متغیر ایجاد می شود. در نمونه ی B به دلیل وجود ساختارهای ناهمگن پرتنش مانند فریت مرزدانه ای درشت و نیز وجود شرایط اعمالی تنش کششی در جوش، منطقه ی اشاعه ی ترک است که تعیین کننده ی عمر خستگی نمونه می باشد و بیش از ۹۰٪ این زمان را به خود اختصاص می دهد (هارسون و هارت^۱، ۱۹۹۰). همان طور که در شکل ۱۲ مشاهده می شود اشاعه ی ترک به طور طبیعی به صورت بین دانه ای رخ داده و حضور خطوط ساحلی معرف این است که شکست در اثر پدیده ی خستگی ایجاد شده است.



شکل ۱۲. منطقه ی شکست در نمونه ی B

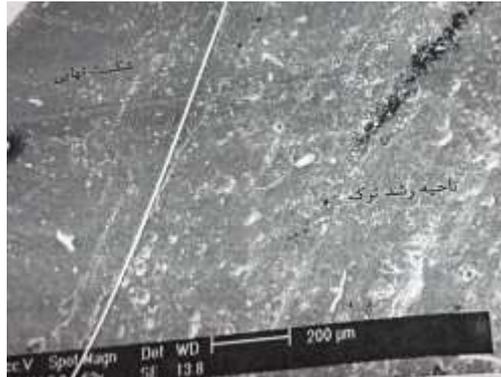
شکل ۱۳ سطح شکست در نمونه ی A را نشان می دهد. همان طور که در شکل ۱۳ مشخص است، رشد ترک در قسمت میانی سطح مقطع جهش رخ داده است و جهت خطوط ساحلی جهت رشد آن را نشان می دهد. به دلیل اعمال تنش های تناوبی این منطقه که ترک در آن رشد کرده است، به صورت برآمده و فرورفته دیده می شود. همان طور که در شکل های ۱۲ و ۱۳ مشاهده می شود، خطوط ساحلی مربوط به نمونه های A و B با یکدیگر متفاوت بوده و فاصله ی بین خطوط با هم فرق می کند.



شکل ۱۳. سطح شکست در نمونه ی A

همان طور که در شکل های ۱۲ و ۱۳ دیده می شود، سطح شکست در دو نمونه با یکدیگر متفاوت بوده و منطقه ی رشد ترک در نمونه ی B نسبت به نمونه ی A کوچکتر بوده و رشد ترک در نمونه ی B به دلیل وجود فریت ویدمن اشتاتن و فریت دانه درشت با سرعت بیشتری انجام شده است.

شکل ۱۴ مرز بین منطقه ی شکست نهایی و رشد ترک را در نمونه ی A نشان می دهد. در این مرز خطوط ساحلی از حرکت باز می ایستد و سطح باقی مانده از نمونه ی دیگر قادر به تحمل نیروهای اعمالی نمی باشد و شکست ناگهانی در قطعه رخ می دهد. اغلب می توان منطقه رشد ترک خستگی را به وسیله ی خطوط ساحلی از منطقه شکست نهایی متمایز کرد.



شکل ۱۴. خط سفید نشان دهنده ی مرز منطقه ی رشد ترک و شکست نهایی

۴-۲-۳. آنالیز نقطه ای

به منظور بررسی درصد عناصر مختلف و پراکندگی آنها در ناحیه ی شکست، سطح شکست نمونه ی B توسط میکروسکوپ عملیاتی WDX-3PC آنالیز شد. نتایج این آنالیز در شکل ۱۵، توزیع یکنواخت ذرات، مربوط به عناصر کربن، منگنز، آهن و کروم نشان داده است.



شکل ۱۵. درصد عناصر مختلف و پراکندگی آن در سطح شکست نمونه ی B

همانطور که در شکل ۱۵ مشاهده می شود، پراکندگی آهن در سطح به صورت یکنواخت بوده اما کروم بیشتر در مرز دانه ها به صورت ناهمگن توزیع شده است. پراکندگی منگنز به صورت یکنواخت تری در سطح مشاهده می شود. بررسی دقیق تر نیازمند آزمایشات بیشتر در تعیین احتمالی حفره ها و ذرات رسوبی و یا تغییرات ترکیب شیمیایی در منطقه ی جوشکاری می باشد.

جدول ۶ مقایسه نتایج آزمون های کشش، خستگی، سختی و متالوگرافی را در نمونه های A و B نشان می دهد.

جدول ۶. مقایسه ی نتایج آزمون ها

استحکام کششی نهایی (MPa)	سختی (HV)	ساختار	استحکام خستگی در 4×10^4 سیکل
۵۸۷	۲۲۱	فریت چند وجهی ریز و همگن	۳۷۱ MPa
۶۱۰	۲۴۳	فریت ویدمن اشتاتن و فریت چند وجهی درشت به صورت ناهمگن	۳۴۰ MPa

همان طور که در بحث خستگی جوش بیان شد، محل های با اتصال متقاطع یکی از نقاط با تمرکز تنش بالا هستند که بایستی مورد توجه دقیق قرار گیرد. در ساختمان کشتی محل اتصال تقویت کننده های طولی با قاب های اصلی عرضی به عنوان یک نقطه ی بسیار حائز اهمیت از جهت شروع ترک خستگی می باشد. علاوه بر این در کشتی های فله بر، بیشتر ترک های خستگی در محل اتصال عرشه به تقویت کننده ی طولی در دو جهت عمودی و عرضی گسترش می یابد؛ بنابراین با توجه به نتایج به دست آمده از جدول بالا توصیه می شود که در این محل ها که خود تمرکز تنش بالایی دارد، در صورت استفاده از جوشکاری الکتروود دستی از ایجاد نقاط توقف و شروع قوس اجتناب شود تا بتوان به افزایش مقاومت خستگی منطقه ی جوشکاری شده کمک کرد.

۵. جمع بندی و نتیجه گیری

۱. استحکام خستگی یک اتصال جوشکاری شده مستقل از استحکام کششی آن است.
۲. عیوب ریز ساختاری موجود در نقاط توقف و شروع قوس، باعث جوانه زنی ترک شده و به تسریع رشد ترک کمک می کند، به طوری که استحکام خستگی در این نقاط نسبت به نقاطی که قوس پیوسته برقرار بوده است، کمتر می باشد
۳. 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.
۴. اجتناب از ایجاد نقاط توقف و شروع قوس در ساختمان کشتی در محل های اتصال تقویت کننده های طولی با قاب های اصلی عرضی که تمرکز تنش بالایی دارند

۵-۱. پیشنهادات برای تحقیقات آتی

۱. مقایسه ی استحکام خستگی در نقاط توقف و شروع قوس در جوش فولاد زنگ نزن با فرآیندهای GTAE, FSW, EBW
۲. بررسی تاثیر عملیات حرارتی بر استحکام خستگی نقاط توقف و شروع قوس در جوش نبشی.
۳. بررسی عددی تنش پسماند در نقاط توقف و شروع قوس در جوش الکتروود دستی فولادهای زنگ نزن.

منابع

۱. اکرامی، علی اکبر؛ تغییر شکل و مکانیک شکست مواد و آلیاژهای مهندسی، انتشارات دانشگاه صنعتی شریف، صفحه ۱۳۸۵، ۵۲۲.
۲. جورج ای، دیترو؛ متالوژی مکانیکی، ترجمه شهره شهیدی، مرکز نشر دانشگاهی، چاپ سوم، ۱۳۸۱.
۳. کوبکی، امیرحسین؛ تکنولوژی جوشکاری، تهران، انتشارات آزاد، ۱۳۸۳.

4. Lassen, T., Recho, N.; "Fatigue Life Analysis of Welded Structure", WILEY, p.p. 11-193, 2008.

5. 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.
6. "ASM Metals Hand Book Vol19. Fatigue and Franchise", ASM international, pp148-1940, 2005.
7. Liangpen, De. Xiao, Fu Ren; "Effect of Welding Wire Composition and Welding Process on the Weld Metal Toughness of Submerged Arc Weld Welded Pipe Pipe Steel". International Journal of Materials, Vol. 16. p.p. 65- 70.
8. Miller, K.j., Makid, A.R.; "The Application of Structural Fracture Mechanics to Various Metal Surface States", Material science, Vol. 33, No.11997, 2002
9. Harrison, P.L and Hart, P,H,M; "Relationships between HAZ Microstructure and CTOD Transition Behavior in Multipass C-Mn Steel Weld", Material Science, PP 141-146,1990.

Fatigue Testing and Fractography of Manual Butt Fusion Welding of Low-Alloy Steel for Stopping and Starting Arc

Hamid Mohammadi Mazrae¹, Gholamreza Khayyati²

1 Faculty Of Welding Materials Engineering, Bandar Abbas Branch, Islamic Azad University, Bandar Abbas, Iran

2 Assistant Professor Of Materials Science and Metallurgy, Shiraz University (Corresponding Author)

Abstract

In this study, the low-cycle fatigue properties and fractography for continuously welded areas have been investigated. For this purpose, ASTM A633 steel grade D is welded by manual butt fusion welding. From continued arc points as well as interrupted and re-established arc points, samples were prepared according to the ASTM E466 standard for low cycle fatigue testing and fractography. According to the result, inappropriate welding thermal cycles have resulted in the formation of a large grain ferrite and Widmanstätten ferrite at the stopping and starting of the arc. At the stopping and starting of the arc due to the creation of large granular ferrite structures, the inclination and porosity phenomenon has intensified, and the formation of Widmanstätten ferrite has accelerated the growth of cracks. The results indicate decreased strength in these samples, while the stiffness and tensile strength are more than continued arc samples.

Keywords: Arc Butt Fusion Welding, Fractography, Low-alloy steel, Stopping and starting of the Arc.
