

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

حمید محمدی مزرعه<sup>۱</sup>، غلامرضا خیاطی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> گروه مهندسی مواد جوشکاری واحد بندرعباس، دانشگاه آزاد اسلامی، بندرعباس، ایران

<sup>۲</sup> استادیار-مهندسی مواد و متالورژی-دانشگاه شیراز (نویسنده مسئول)

### 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 کشش و خستگی تهیه شد. نتایج نشان دهنده کاهش استحکام در این نمونه ها می باشد. اگر چه در این نقاط استحکام کششی بیشتر از نمونه هایی است که قوس پیوسته برقرار بوده است. با توجه به اینکه استحکام کششی در اتصالات جوشکاری شده بر روی رفتار خستگی آن ها تاثیری ندارد، آزمایش کشش بر روی نمونه ها نشان داد که علیرغم افزایش استحکام کششی 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**

فرآیند جوشکاری، یک روند پیچیده است که با اعمال تنش های حرارتی و استحاله فاز جامد، منجر به تغییرات متالورژیکی در ساختار ماده و تغییر شکل های هندسی آن شده و این امر باعث افزایش تنش به صورت موضعی می شود. به علت گرادیان دمای غیر یکنواخت و انبساط و انقباض حرارتی که باعث تغییر شکل پلاستیک موضعی در حین جوشکاری و فرآیند سرد شدن می شود، همواره تنش های پسماندی در جوش ایجاد می گردد. علاوه بر این تنش های پسماند، ناپیوستگی های متفاوت و غیر قابل اجتناب در جوش، مکان هایی برای جوانه زنی و رشد ترک خستگی ایجاد می کند. ترک های خستگی معمولاً از سطح و یا از محل عیوب داخلی جوانه زده و رشد می کند. در حالت اول علت ترک وجود عیوب طراحی و جوشکاری قطعه است و در حالت دوم وجود عیوب متالورژیکی موجود در ریز ساختار مانند ترک های ناشی از سختی بالا، حضور هیدروژن و جدایش ناخالصی ها از فلز پایه موجب تشکیل ترک می شود. 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 منشاء ترک که باعث این شکست می شود، از منطقه ی جوش جوانه زده و در فلز جوش یا منطقه ی متاثر 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.

**۱. لزوم انجام تحقیق**

فولادهای با استحکام کششی بالا کاربرد گسترده ای در صنایع کشتی سازی، ساخت جرثقیل ها و مخازن دارند و برای ساخت اتصالات جوشکاری شده از این فولادها، غالباً از فرآیند جوشکاری الکترو دستی که یکی از متداول ترین فرآیندهای جوشکاری مورد استفاده در کشور ما می باشد، استفاده می گردد. به دلیل آنکه این فرآیند جوشکاری به صورت دستی انجام می شود، 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 منطقه ی جوشکاری شده اجتناب ناپذیر است. در تحقیق حاضر سعی بر آن است تا با انجام آزمایش خستگی و کشش 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****۱-۲. معرفی فولاد ASTM A633-D**

فولادهای ساده کربنی حاوی حداکثر ۱ درصد کربن، ۱/۶۵ درصد منگنز و ۰/۶۵ درصد سیلیسیم می باشند. این فولادها بعد از شکل دهی توسط نورد مورد استفاده قرار می گیرند، در بعضی مواقع نیز بعد از کار مکانیکی تحت عملیات حرارتی آنیل یا نرماله قرار می گیرند. (اوت و همکاران<sup>۱</sup>، ۱۹۹۹)

از طرفی فولادهای استحکام بالا به دو دسته تقسیم می شوند که عبارتند از: الف) فولادهای کربنی استحکام بالا معروف به فولادهای کربن منگنز<sup>۲</sup>، ب) فولادهای کم آلیاژی استحکام بالا<sup>۳</sup>.

<sup>1</sup> Ott et al<sup>2</sup> C-Mn Steel<sup>3</sup> High Strength Low Alloy Steel (HSLA)

فولادهای استحکام بالا برای دست یابی به خواص مکانیکی بالاتر نسبت به فولادهای کربنی طراحی و تولید می شوند. این فولادها به طور کلی بر اساس خواص مکانیکی طبقه بندی شده و ترکیب شیمیایی در آن ها به نحوی تنظیم می شود تا استحکام کششی آن ها در محدوده ۷۰۰ - ۴۰۰ Mpa قرار گیرد. (اوت و همکاران، ۱۹۹۹)

فولاد ASTM A633-D معادل EN10113 جزء فولادهای کم آلیاژ استحکام بالا می باشد. حضور منگنز استحکام، سختی پذیری عمر خستگی و چقرمگی را در این فولادها افزایش داده و دمای انتقال شکست نرم به ترد و انعطاف پذیری را کاهش می دهد (ASM, 2005). این فولادها برای کار در دماهای پایین و نزدیک به دمای محیط مناسب هستند. منگنز و سیلیسیم افزوده شده به این فولادها هتائیر محسوسی بر تشکیل فریت و سختی پذیری داشته و به کنترل اندازه دانه ها نیز کمک می کنند. جدول ۱ ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی فولاد ASTM A633-D را نشان می دهد. (ASTM, 1995)

جدول ۱. ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی فولاد ASTM A633-D (AWS, 1976)

ترکیب شیمیایی (درصد وزنی)							خواص مکانیکی		
S	Cr	Ni	P	Si	Mn	C	درصد از یاد طول	استحکام (MPa)	استحکام کششی (MPa)
۰/۰۱	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۰۰۵	۰/۲۵	۱/۵	۰/۰۳۶	۱۸	۳۱۵	۴۵۰

## ۲-۲. خستگی

از سال ۱۸۳۰ میلادی وهلر<sup>۱</sup> مشخص نمود که فلزات تحت تنش تناوبی، در تنش به مراتب کمتر از تنش شکست، خواهند شکست. شکست هایی که در شرایط بارگذاری دینامیکی رخ می دهند، شکست های خستگی<sup>۲</sup> نامیده می شوند (جورج، ۱۳۸۱).

هیچ گونه تغییر واضحی در ساختار فلزی که به علت خستگی می شکند پدید نمی آید تا بتوان به عنوان مدرکی برای شناخت دلایل شکست خستگی از آن استفاده نمود. با توسعه صنعت و افزایش تعداد تجهیزاتی که تحت بارگذاری تناوبی هستند، خستگی به عنوان یک عامل تخریب اصلی محسوب شده است و اکنون غالباً گفته می شود که عامل حداقل ۹۰ درصد شکست های ناشی از علل مکانیکی تحت تاثیر خستگی می باشد (جورج، ۱۳۸۱).

شکست خستگی خیلی سریع ر می دهد و مقطع شکست آن به صورت شکستی با ظاهر ترد، بدون هیچگونه تغییر شکل پلاستیکی می باشد. معمولاً سطح شکست در مقیاس میکروسکوپی بر جهت تنش کششی (اصلی) عمود است. ظاهر سطح شکست از یک ناحیه هموار حاصل از اشاعه ترک در مقطع و یک ناحیه ناهموار که نشان دهنده شکست نرم می باشد، تشکیل شده است (مادوکس، ۲۰۰۳).

سه عامل برای وقوع شکست خستگی ضروری است که عبارتند از (جورج، ۱۳۸۱):

الف) تنش کششی

ب) دامنه ی تغییرات در تنش های اعمالی

پ) سیکل های اعمال تنش

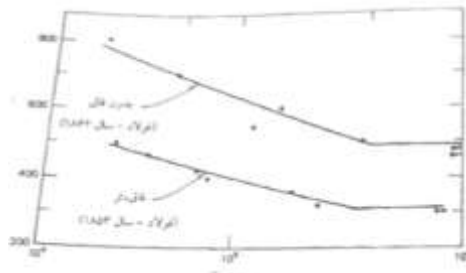
متغیرهای دیگری مانند تمرکز تنش، خوردگی، دما، بار اضافی، ساختار متالورژیکی نامناسب، تنش های باقی مانده و تنش های مرکب وجود دارند که شرایط را برای ایجاد خستگی تقویت می کنند (مادوکس، ۲۰۰۳).

<sup>۱</sup> Wohler

<sup>۲</sup> Fatigue Failure

یکی از اولین تحقیقات مربوط به آثار بارگذاری تناوبی با تنش کنترل شده بر عمر خستگی را وهلر انجام داد، او محور چرخ قطار را که بر اثر شکست تخریب شده بود، مطالعه نمود. بر اساس نتایج تحقیق وی که به صورت منحنی تنش بر حسب تعداد سیکل تا شکست (که نمودار S-N نامیده می شود) در شکل ۱ نشان داده شده است، می توان به چند موضوع مهم دست یافت. اولاً آنکه با کاهش میزان تنش، عمر خستگی یک محور افزایش می یابد و به نظر می رسد که در تنش های کمتر از یک سطح معین، عمر نامحدود می باشد، با حداقل قبل از  $10^6$  سیکل شکست خستگی رخ نمی دهد. ثانیاً وجود شیار عمر خستگی را شدیداً کاهش می دهد (مادوکس<sup>۱</sup>، ۲۰۰۳).

بر اساس این مشاهدات بسیاری از محققین خستگی را به عنوان فرآیندی سه مرحله ای شامل الف) جوانه زنی ترک ب) رشد ترک و پ) تخریب نهایی تعریف کرده اند. وقتی نواقص طراحی یا ریز ترک های متالورژیکی همراه باشد، مرحله ی جوانه زنی کوتاه شده و یا کاملاً از بین می رود و در نتیجه به کاهش عمر خستگی منجر می شود (جورج، ۱۳۸۱).



شکل ۱. منحنی های S-N وهلر برای فولاد محور چرخ قطار در دو حالت شیاردار و بدون شیار (جورج، ۱۳۸۱).

### 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 ۲ ارائه شده است. سیم جوش مورد مصرف جهت جوشکاری نیز از نوع E8018-C<sub>3</sub>-H<sub>4</sub> بوده است که ترکیب شیمیایی آن هم در جدول ۳ ارائه گردیده است.

#### جدول ۲. 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 ۳. ترکیب شیمیایی سیم جوش بر حسب درصد وزنی

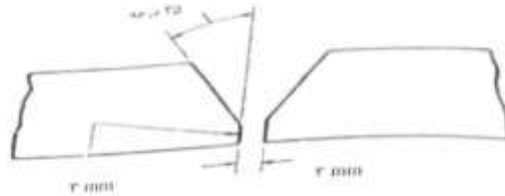
P	Cu	Al	S	Mn	Si	C
۰/۰۷	۰/۸۲	۱۲۰	۰/۰۳	۱/۴۱	۰/۸۲	۰/۰۷

#### 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 ۱۵×۳۰×۱۵ میلی متر تهیه گردید و سپس با استفاده از دستگاه پخ زن، طرح اتصال مناسب

<sup>۱</sup> Maddox

ایجاد شد که تصویر شماتیک آن در شکل ۲ 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 ۳۵۰ درجه سانتی گراد گرم شدند.



شکل ۲. 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 الکتروود 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 ۴ اندازه گیری گردید، در حالیکه در نقاط توقف و شروع دوباره قوس پارامترهای جوشکاری بر اساس بود. از ورق های جوشکاری شده (شکل ۳) نمونه هایی از نقاط مختلف توسط اره مغناطیسی بریده شدند.

### جدول ۴. 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

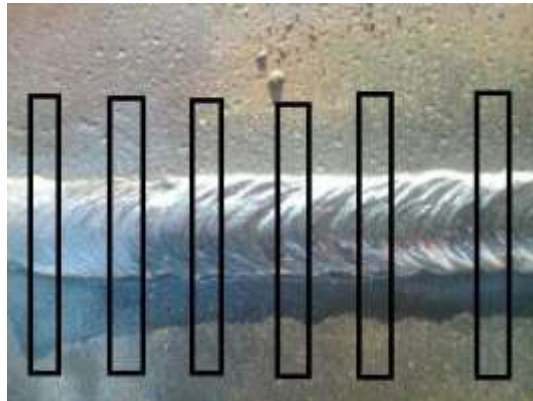
### جدول ۵. مشخصات جوشکاری در نقاط توقف و شروع قوس

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 ۳. 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 ۴ این نمونه ها از نقاط تداوم قوس و نقاطی که قوس متوقف و دوباره شروع شده، تهیه شد.



شکل ۴. نحوه ی برشکاری نمونه ها

### ۳-۴. آزمون ها

#### ۳-۴-۱. ترکیب شیمیایی فلز جوش

جهت تعیین ترکیب شیمیایی فلز جوش قسمتی از فلز جوش نمونه ها با استفاده از روش اسپکترومتری نشری نوری (OES) تحت آنالیز شیمیایی قرار گرفت.

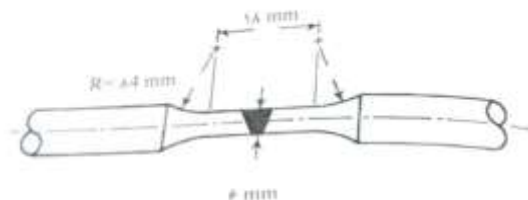
#### ۳-۴-۲. آزمون غیرمخرب اولتراسونیک

پس از انجام فرآیند جوشکاری بر روی ورق ها، برای اطمینان از عدم حضور عیوب جوشکاری، آزمون اولتراسونیک طبق استاندارد AWS D1.1 انجام شد. سپس نتایج با کد AWS D1.1 مطابقت و عیوب احتمالی و حد پذیرش آنها بررسی گردید.

#### ۳-۴-۳. تهیه نمونه ی خستگی کم دامنه

نمونه های آزمون خستگی با توجه به استاندارد ASTM E466 به تعداد ۸ نمونه از نقاطی که در آنها قوس به صورت پیوسته ادامه داشت و ۷ نمونه از مناطقی که در آن قوس قطع و وصل شده بود، تهیه گردیدند. به نحوی که فلز جوش در مرکز نمونه قرار گیرد. نمونه هایی از نقاطی که در آن قوس در هر پاس جوشکاری به طور پیوسته ادامه داشت، با عنوان نمونه های A و نمونه هایی از نقاطی که در آنها قوس در همه پاس ها قطع و دوباره برقرار شده بود. با عنوان نمونه های B نام گذاری شدند.

ابعاد نمونه ی استاندارد آزمون در شکل ۵ مشاهده می شود. همچنین تصویر نمونه ساخته شده در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۵. تصویر شماتیک نمونه خستگی



شکل ۶. تصویر نمونه ی ساخته شده

### ۳-۴-۴-آزمایش کشش

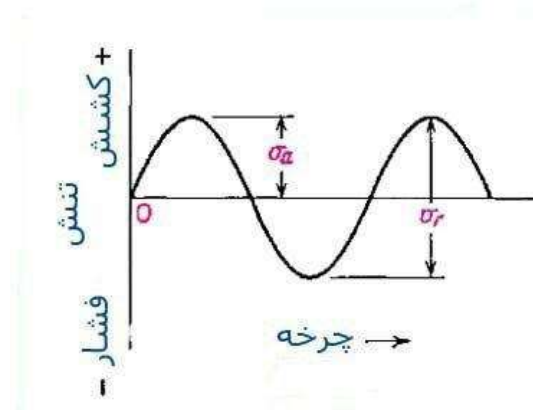
بر اساس استاندارد ASTM E466 برای انجام تست خستگی باید استحکام تسلیم و استحکام نهایی نمونه را به دست آورد و بر اساس استحکام نهایی نمونه، حداکثر نیروی بکار رفته جهت شکست، بین  $10^4$  تا  $10^6$  سیکل (خستگی کم دامنه) انتخاب گردد. برای هر دو حالت نمونه های جوشکاری شده، دو نمونه توسط دستگاه Instron مدل ۸۵۰۲ تحت تست کشش قرار گرفت.

### ۳-۴-۵. 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 ۷) به صورت کشش- فشار تحت بارگذاری قرار گرفتند که نمودار اعمال نیرو در شکل ۸ 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 ۷. دستگاه تست خستگی Instron مدل ۸۵۰۲



شکل ۸. 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.

## ۴. نتایج و بحث

## ۴-۱. ترکیب شیمیایی فلز جوش

متوسط آنالیز چهار نقطه ی مختلف جوش نمونه B در جدول ۶ نشان آورده شده است.

جدول ۶. درصد وزنی عناصر در فلز جوش نمونه B

Ni	Cr	C	Mn	Cu	S	Si	P
۰/۴	۰/۵۱	۰/۰۳	۱/۲۳	۰/۱	۰/۰۰۶	۰/۳۶	۰/۰۲

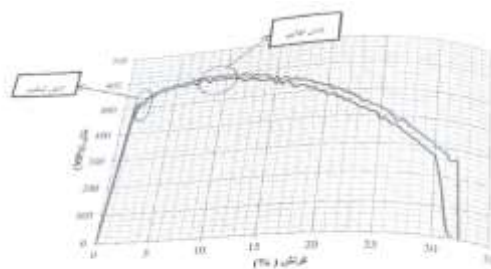
## ۴-۲. نتایج آزمون غیرمخرب اولتراسونیک

نتایج آزمون اولتراسونیک پس از فرآیند جوشکاری نمونه ها نشان داد که هیچ کدام از نمونه های جوشکاری شده در منطقه فلز جوش و فلز پایه دارای عیوب نبودند.

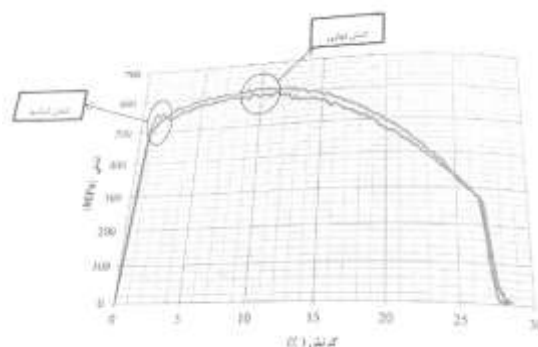
## ۴-۳. آزمون کشش

استاندارد ASTM E8M روش ها و نیازهای آزمون را برای تعیین رابطه ی تنش- کرنش مواد با استفاده از آزمون های کشش یکنواخت، تعریف می کند. برای بررسی استحکام خستگی نمونه ها نیاز به اندازه گیری مقدار استحکام تسلیم نهایی آنها داریم. به همین منظور ابتدا بر روی دو نمونه از A و نمونه از B آزمون کشش انجام شد. نمونه ها تا مرحله ی شکست تحت آزمون کنترل شده با کرنش قرار می گیرند. نمونه های کشش با پدیده ی گلویی شدن دچار شکست شدند و منحنی های تنش- کرنش مطابق با شکل ۹ برای هر کدام به دست آمد. در شکست کششی تغییر شکل پلاستیک ناگهانی به تولید یک ناحیه گلویی منجر می شود. گلویی در نقطه ناپایداری پلاستیک که افزایش استحکام ناشی از کارسختی افت می کند تا کاهش سطح مقطع را جبران کند، رخ دهد.





شکل ۹. منحنی تنش - کرنش در نمونه A



شکل ۱۰. منحنی تنش - کرنش در نمونه B

جدول ۷. نتایج آزمون کشش

نمونه B	نمونه A	
۵۴۱	۵۱۰	استحکام تسلیم (MPa)
۶۱۰	۵۸۷	استحکام نهایی (MPa)

همانطور که از گراف ها مشخص است حد تسلیم و استحکام نهایی در نمونه ی B بیشتر از نمونه ی A بوده و تغییر طول در نمونه ی A نسبت به نمونه ی B بیشتر است. البته شیب خط بین در نقطه استحکام تسلیم و استحکام نهایی که معرف کارسختی نمونه است، در نمونه ی A بیشتر بوده است. با توجه به داده های به دست آمده در آزمون کشش، بر اساس استحکام نهایی در هر دو نمونه های A و B، تنش های اعمالی به نمونه های خستگی مشخص شد. استحکام تسلیم و استحکام کششی بیشتر در نمونه های توقف و شروع قوس باعث افزایش حد تحمل اتصالات شده و بنابراین جوانه زنی ترک با تاخیر انجام می شود؛ اما به دلیل اینکه تغییر طول در نمونه های توقف و شروع قوس کمتر است پس رشد ترک خستگی سریع تر انجام می شود و بنابراین شکست نهایی تسریع می شود.

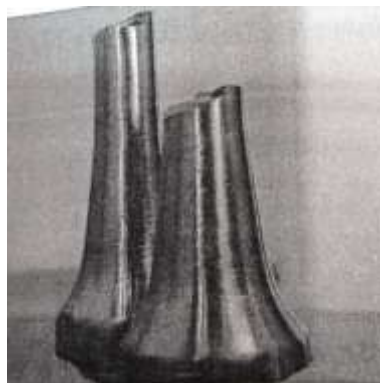
#### ۴-۴. آزمون خستگی

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

## جدول ۸. 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

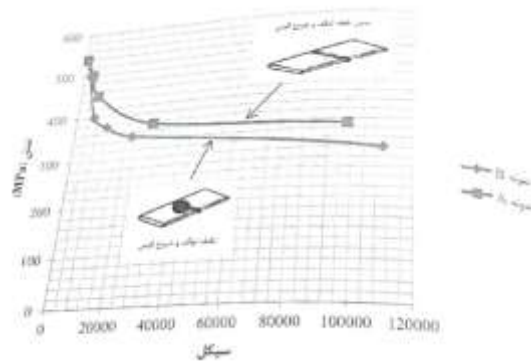
از آنجایی که در سازه های جوشکاری شده به دلیل وجود ساختارهای ناهمگن و سخت که مستعد ترک و تنش های کششی اضافی، در محل وقوع شکست منطقه جوش می باشد، لذا در آزمون های خستگی انجام شده، کلیه ی نمونه ها با زاویه مایل و از منطقه جوش دچار ترک و شکست شد (شکل ۱۱)



شکل ۱۱. نمونه ی شکست خستگی

همان طور که در شکل ۱۲ 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. لذا همان طور که در شکل های ۹، ۱۰، ۱۱ و ۱۲ مشاهده می شود، علیرغم اینکه نمونه ی B استحکام کششی بالاتری نسبت به نمونه A داشته است، اما استحکام خستگی آن کمتر بوده است. برای بررسی دقیق تر استحکام خستگی باید ساختار نمونه های شکست در A و B مطالعه شود.



شکل ۱۲. نمودار مقایسه‌ی نتایج خستگی

##### ۵. جمع بندی، نتیجه گیری و پیشنهادات

در این تحقیق تغییرات در نقاط توقف و شروع قوس و اثر آن بر روی خواص خستگی بررسی شد و نتایج زیر حاصل شد:

۱. استحکام خستگی یک اتصال جوشکاری شده مستقل از استحکام کششی آن است.
۲. سیکل عملیات حرارتی اعمالی نامناسب در نقاط توقف و شروع قوس باعث ایجاد ساختار فریت ویدمن اشتاتن و فریت دانه درشت و ایجاد عیوب متالورژیکی و ریزساختاری در فلز جوش این مناطق می شود.
۳. در کنار کاهش اندازه‌ی 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. مرزدانه های فریت ویدمن اشتاتن به واسطه ی حضور تنش های پسماند کششی بهترین مسیر برای رشد ترک است و از آنجاییکه فریت ویدمن اشتاتن بیشتری در ساختار فلز جوش نقاط توقف و شروع قوس دیده می شود، استحکام به خستگی در فلز جوش این نقاط کمتر است.

##### ۵-۱. پیشنهادات

۱. بررسی استحکام خستگی نقاط قوت و شروع قوس در  $3 \times 10^6$  سیکل به منظور به دست آوردن کلاس خستگی
۲. مقایسه ی استحکام خستگی در نقاط توقف و شروع قوس در جوش فولاد زنگ نزن با فرآیندهای GTAE, FSW, EBW.
۳. بررسی تاثیر عملیات حرارتی بر استحکام خستگی نقاط توقف و شروع قوس در جوش نبشی.

##### منابع

۱. جورج ای، دیتتر؛ متالورژی مکانیکی، ترجمه شهره شهیدی، مرکز نشر دانشگاهی، چاپ سوم، ۱۳۸۱.
2. "ASM Metals Hand Book Vol19. Fatigue and Franchise", ASM international, pp148-1940, 2005.
3. "ASTM Series-A, Standard Specification for Normalized High-Strength Low-Alloy Structural Steel Plates", American Society for Testing and Materials, 1995.
4. "AWS handbooks, Metal and their Weld ability 7<sup>th</sup> ed", AWS publication; 1976.
5. Maddox, Si.; "Key Developments in the Fatigue Design of Welded Constructions", IIW Portvin Lecture, p.p. 7-40, 2003.
6. Ott, C.W., Couch, M.R., Hodacko, V.J.; "AWS Welding Handbook Vol 1, Carbon & Low Alloy Steel", American Welding Society, 1999.

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

Hamid Mohammadi Mazrae<sup>1</sup>, Gholamreza Khayyati<sup>2</sup>

*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 for continuously welded areas at stopping and starting arc of manual butt fusion welding for low-alloy steel with high tensile strength 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 tensile and fatigue testing. The results indicate a decrease in strength in these samples. However, tensile strength in these points was greater than points with continued arc. In fact, tensile strength in the welded joints does not affect their fatigue behavior; therefore, tensile testing on the samples showed decreased fatigue strength, despite increased tensile strength at stopping and starting of the arc.

**Keywords:** Arc Butt Fusion Welding, Fatigue strength, Low-alloy steel, Stopping and starting of the arc.

---