

# بررسی تجربی رفتار رشد ترک و طول عمر خستگی نمونه‌های متقارن U-شکل

محمود شریعتی\*

دانشیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

\*شاهرود، صندوق پستی ۳۱۶

mshariati@shahroodut.ac.ir

(دریافت مقاله: اردیبهشت ۱۳۸۶، پذیرش مقاله: فروردین ۱۳۸۷)

**چکیده-** در این تحقیق رفتار رشد ترک و طول عمر خستگی نمونه‌های U-شکل متقارن به‌طور تجربی بررسی و مطالعه شده است. ورقهای استفاده شده، ضخامت‌های متفاوت ۱ و ۱/۵ میلیمتر دارند که به‌صورت ۱-۱ میلیمتر، ۱-۱/۵ میلیمتر و ۱/۵-۱/۵ میلیمتر در فرایند جوشکاری نقطه‌ای به یکدیگر متصل شده‌اند. جنس نمونه‌ها از فولاد نرم انتخاب شده است. نمونه‌ها توسط دستگاه سروهیدرولیک INSTRON 8802 با ظرفیت نیروسنج ۲۵ کیلونیوتن تحت بارگذاری متناوب با دامنه ثابت اما سطوح بار مختلف قرار گرفتند. در حین انجام آزمایشها، طول ترک به‌ازای تعداد سیکل مشخصی توسط میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی ۱۰۰ برابر با دقت اندازه‌گیری شد. از نتایج تجربی مشاهده می‌شود که در نمونه‌های با ضخامت متفاوت، ترک همواره در ورقه نازک شروع می‌شود و نیز این ورق نازک است که در نهایت دچار شکست می‌شود. همچنین در نمونه‌های با ضخامت یکسان، ترک در هر دو ورق تقریباً با طولی یکسان ایجاد می‌شود. ضمناً استفاده از جوشهای نقطه‌ای در قطعات با ضخامت متفاوت، تغییر چشمگیری در طول عمر خستگی آنها ایجاد نمی‌کند. ضمناً هر چه قطر نقطه جوش بیشتر باشد، طول عمر خستگی بالاتری دارد.

**کلید واژگان:** جوشکاری نقطه‌ای، طول عمر خستگی، ترک، انتشار ترک، نمونه‌های U-شکل.

## ۱- مقدمه

جوش شده در عمل تحت تأثیر بارگذاری مرکب قرار دارند، پژوهشگران بر روی نمونه‌هایی با هندسه‌های مختلف تحقیق کرده‌اند. از میان آنها می‌توان به هارتمن<sup>۱</sup> [۲]، دیویدسون<sup>۲</sup> [۳]، راجا<sup>۳</sup> [۴]، ونگ و اوینگ<sup>۴</sup> [۵]، سیلام و همکاران<sup>۵</sup> [۶]، شپیرد و پن<sup>۶</sup>

از فرایند نقطه جوش به‌طور وسیعی به‌منظور متصل کردن دو ورق به یکدیگر به‌ویژه در صنایع اتومبیل‌سازی استفاده می‌شود. تاکنون پیش‌بینی و مدل‌سازی طول عمر خستگی انواع نمونه‌ها توسط محققان مختلفی مورد تحقیق و مطالعه قرار گرفته است. به‌عنوان مثال کار ژنگ<sup>۱</sup> را ببینید [۱]. از آنجا که قطعات نقطه

2. Hartmann  
3. Davidson  
4. Radaj  
5. Wang and Ewing  
6. Swellam et al.  
7. Sheppard and Pan

1. Zhang

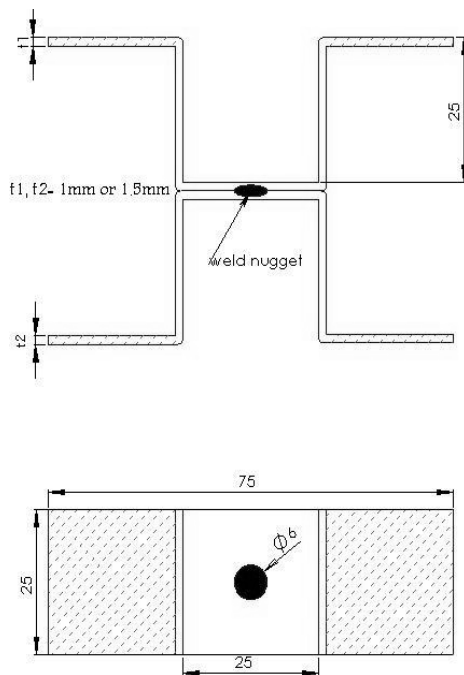
روش تنش ساختاری معادل مطالعه کرده‌اند [۱۵]. لین و همکاران<sup>۱۲</sup> در زمینه زوال نقطه جوشها با در نظر گرفتن حالت تنش صفحه‌ای تحقیق کرده‌اند [۱۶].

هدف از این پژوهش، بررسی رفتار رشد ترک و تعیین طول عمر خستگی نمونه‌های نقطه جوش شده U - شکل متقارن تحت تأثیر بارگذاری‌های مختلف است. اثر قطر نقطه جوش در دو قطر ۴ میلیمتر و ۶ میلیمتر نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- نتایج تجربی

### ۲-۱- نمونه‌های آزمایش

در این تحقیق از نمونه‌های U - شکل متقارن استفاده شده است. هدف از این آزمایش، پیش‌بینی عمر خستگی و تعیین رفتار رشد ترک در نقطه جوش و در عرض ورقه و همچنین بررسی نوع شکست با توجه به قطر دکمه جوش است. شکل ۱ هندسه نمونه مورد آزمایش را نشان می‌دهد.



شکل ۱ هندسه نمونه مورد آزمایش

[۷] و ژنگ [۸] اشاره کرد. از آنجا که محیط اطراف دکمه جوش<sup>۱</sup> به‌عنوان ترک طبیعی یا شیار اولیه تلقی می‌شود، معمولاً در مکانیک شکست به تجزیه و تحلیل نقطه جوش و تعیین طول عمر خستگی آن پرداخته می‌شود. نتایج تجربی در تحلیل و مدل‌سازی رفتار نقطه جوش توسط مفاهیم مکانیک شکست، نقش مهمی ایفا می‌کنند. زیرا نتایج حاصل از مدلها باید با نتایج تجربی مطابقت داشته باشد؛ در غیر این‌صورت مدلها قابل اعتماد نیست. از جمله تحقیقاتی که در آنها آزمایشهای تجربی بر روی انواع نمونه‌های نقطه جوش شده انجام شده، می‌توان به مقالات زیر اشاره کرد. ادیب و همکاران<sup>۲</sup> با استفاده از روش حجمی<sup>۳</sup> به پیش‌بینی طول عمر خستگی نقطه جوشها پرداخته‌اند [۹]. زین سان و همکاران<sup>۴</sup> تأثیر اندازه منطقه ذوب و مد زوال<sup>۵</sup> را بر بار حداکثر و میزان جذب انرژی فولادهای پر استحکام بررسی کرده‌اند [۱۰]. زین لانگ و همکاران<sup>۶</sup> در زمینه خواص خستگی و مشخصه‌های زوال ورقهای پر استحکام نقطه جوش شده پژوهش کرده‌اند [۱۱]. بی یونگ هو چوئی و همکاران<sup>۷</sup> در زمینه طول عمر خستگی ورقهای فولادی نقطه جوش شده سه‌تایی (سه ورق بر روی یکدیگر) تحقیق کرده‌اند [۱۲]. لین و همکاران<sup>۸</sup> در زمینه مدل‌سازی رشد ترک خستگی نقطه جوشها تحت شرایط بارگذاری دوره‌ای<sup>۹</sup> مطالعه کرده‌اند [۱۳]. نینگ پن و همکاران<sup>۱۰</sup> در زمینه پیش‌بینی طول عمر خستگی نقطه جوشها تحت محدوده کرنش دوره‌ای تحقیق کرده‌اند [۱۴]. هونگ تائه کنگ<sup>۱۱</sup> در خصوص پیش‌بینی طول عمر خستگی اتصالات نقطه جوش شده با استفاده از

1. Nugget
2. Adib H
3. Volumetric Method
4. Xin Sun
5. Failure
6. Xin Long
7. Byoung-Ho Choi
8. S.-H. Lin
9. Cyclic
10. Ning Pan
11. Hong Tae Kang

## ۲-۲- شرایط جوشکاری نمونه‌ها

نمونه‌های آزمایش با استفاده از دستگاه جوش نقطه‌ای پدالی جوشکاری شد. شرایط جوشکاری به شرح زیر است:  
نیرو: به صورت تجربی توسط کاربر وارد شد.

جریان جوشکاری: ۸ kA

زمان نگهداری: ۳ ثانیه

قطر الکترود: در این سری از آزمایشها برای ایجاد جوش نقطه‌ای با قطر متغیر از الکترودهایی با قطر ۴ و ۶ میلی‌متر استفاده شد.  
جنس نمونه‌ها: فولاد نرم.

ضخامت ورقه‌های به کار رفته متفاوت بود و از دو نوع ورقه با ضخامت ۱/۵ میلی‌متری استفاده شد.

## ۲-۳- روش نامگذاری نمونه‌های U- شکل

با توجه به استفاده از ورقه‌هایی با دو ضخامت متفاوت، نمونه‌های U- شکل به دو گروه که هر یک شامل سه گروه مختلف است، تقسیم شد. گروه اول نمونه‌هایی با قطر دکمه جوش ۴ mm است. این نمونه‌ها به صورت UA\*\*\*-\*\* UA نامگذاری می‌شود. UA نشانه نمونه‌های با قطر دکمه جوش ۴ میلی‌متر است. عدد اول و عدد دوم ضخامت ورقه‌های تشکیل دهنده نمونه و عدد سوم شماره نمونه در هر گروه است. گروه دوم (نمونه‌های با قطر دکمه جوش ۶ میلی‌متر) نیز مانند گروه اول نامگذاری می‌شود، با این تفاوت که نشانه نمونه UB است. به عنوان مثال، نشانه UA۱۰-۱۵-۱ بدین معنی است که ورقی با ضخامت ۱ میلی‌متر به ورقی به ضخامت ۱/۵ میلی‌متر با قطر نقطه جوش ۴ میلی‌متر جوشکاری شده است. عدد ۱ نشان‌دهنده اولین نمونه از این گروه است.

## ۲-۴- خواص ماده

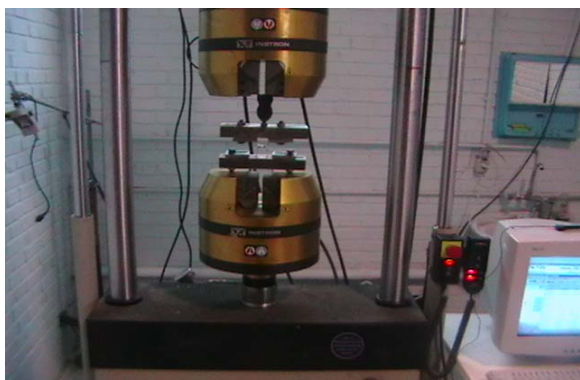
تمامی نمونه‌های استفاده شده در این تحقیق از جنس فولاد فولاد نرم بود. آزمایش کشش استاندارد به کمک دستگاه INSTRON 8802 توسط مؤلفان و بر طبق استاندارد

ASTM-E8<sup>۱</sup> به منظور تعیین نمودار تنش- کرنش انجام شد که در نتیجه، تنش تسلیم ماده برابر ۲۶۰ مگاپاسکال و استحکام نهایی آن برابر ۳۴۰ مگاپاسکال به دست آمد. حداکثر نیروی متوسط قابل تحمل توسط ورق ۱ میلی‌متری برابر ۴۲۴۹N و ورق ۱/۵ میلی‌متری برابر ۶۵۱۶N بود. عرض نمونه‌های کشش استاندارد برابر ۱۲/۵ میلی‌متر بود.

## ۳- آزمایشهای خستگی

هدف از آزمایشهای خستگی در این تحقیق عبارت است از:

- ۱- تعیین طول عمر خستگی نمونه‌ها
  - ۲- اندازه‌گیری میزان رشد ترک در عرض نمونه (اندازه‌گیری رشد ترک از زمانی که ترک بر روی سطح نمونه قابل رؤیت می‌شد تا هنگامی که نمونه دچار شکست کامل می‌شد، ادامه داشت)؛
  - ۳- بررسی نوع شکست با توجه به قطر دکمه جوش؛
  - ۴- پیش‌بینی شروع انتشار ترک خستگی.
- کلیه آزمایشهای خستگی با استفاده از دستگاه سروهیدرولیک تحت بارگذاری با دامنه ثابت انجام شد. همچنین آزمایشها در حالت کنترل بار و با فرکانس ۱۰ Hz انجام شد. نحوه قرار گرفتن نمونه‌ها در دستگاه در شکل ۲ نشان داده شده است.

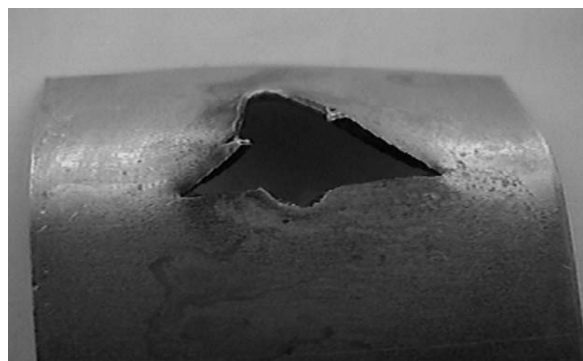


شکل ۲ نحوه قرار گرفتن نمونه‌ها در دستگاه تست خستگی

را تحمل کرده است. همانطور که مشاهده می‌شود ترک در هر دو ورق ایجاد شده اما در یکی از آنها رشد بیشتری داشته است و ترک عرض نمونه را تا حد زیادی طی کرده است.



الف) زوال نقطه جوش بدون رشد ترک



ب) کنده شدن نقطه جوش پس از رشد ترک

شکل ۳ انواع واماندگی دکمه جوش



شکل ۴ نحوه رشد ترک در ورقهای با ضخامت ۱/۵ میلیمتر

### ۳-۱- نتایج تعیین طول عمر خستگی و نوع شکست نمونه‌ها

در این بخش هدف از آزمایش، تعیین طول عمر خستگی و شناسایی رفتار خستگی در نمونه‌های U - شکل حاوی اتصالات جوش نقطه‌ای است.

نتایج آزمایشها برای نمونه‌های UA و UB در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است. در این جداول علاوه بر طول عمر خستگی نمونه‌ها، نوع شکست نهایی هر نمونه نیز ثبت شده است. به‌طور کلی در نمونه‌های U - شکل دو نوع شکست مشاهده شد.

۱- شکست دکمه جوش<sup>۱</sup>: این نوع واماندگی به دلیل کوچک بودن قطر دکمه جوش یا بزرگ بودن نیروی اعمال شده رخ می‌دهد. این شکست در فصل مشترک دکمه جوش دو ورقه اتصالی به وجود می‌آید. اگر نیروی اعمال شده از حد تحمل نقطه جوش بیشتر باشد، زوال به صورت کاملاً ناگهانی و بدون رشد ترک در ورقهای متصل شده رخ می‌دهد (شکل ۳-الف)، اما اگر نیروی اعمال شده کمی کمتر از حد تحمل و استحکام نقطه جوش باشد، ابتدا ترک به مقدار کمی (در حد ۲-۱ میلیمتر) رشد کرده و سپس وامانده می‌شود.

۲- کنده شدن دکمه جوش<sup>۲</sup>: در این نوع شکست ابتدا ترک در ضخامت ورقه کاملاً رشد می‌کند و پس از رسیدن به سطح نمونه و رشد قابل توجه در عرض نمونه، به دلیل کاهش استحکام نمونه، دکمه جوش از جای خود کنده شده و شکست رخ می‌دهد (شکل ۳-ب).

همچنین نحوه رشد ترک در چند نمونه U - شکل در شکل‌های ۴ تا ۷ نشان داده شده است

شکل ۴ نمونه ۴-۱۵-۱۵ UB را نشان می‌دهد که ضخامت هر دو ورق در آن ۱/۵ میلیمتر است و تحت تأثیر نیروی حداکثر برابر ۹۰۰ نیوتن قرار گرفته و ۲۰۲۷۳۰ دوره بارگذاری

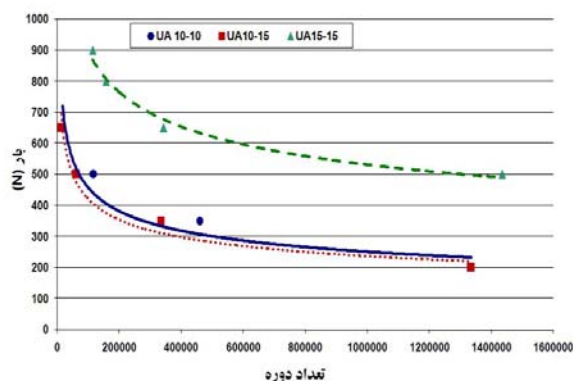
1. Nugget Fracture  
2. Nugget Pull Out

شکل ۷ نمونه ۲-۱۵-۱۵ UA را نشان می‌دهد که ضخامت هر دو ورق ۱/۵ میلیمتر است و تحت تأثیر نیروی حداکثر برابر ۶۵۰ نیوتن قرار گرفته و ۳۴۲۸۸۱ دوره بارگذاری را تحمل کرده است. همانطور که مشاهده می‌شود ترک به طور قابل توجهی در یکی از ورقها رشد کرده اما در ورق دیگر ترکی مشاهده نمی‌شود.



شکل ۷ نحوه رشد ترک در ورقهای با ضخامت ۱/۵ میلیمتر

در شکل ۸، نمودار بار بر حسب عمر خستگی برای بعضی از نمونه‌های UA ارائه شده است.



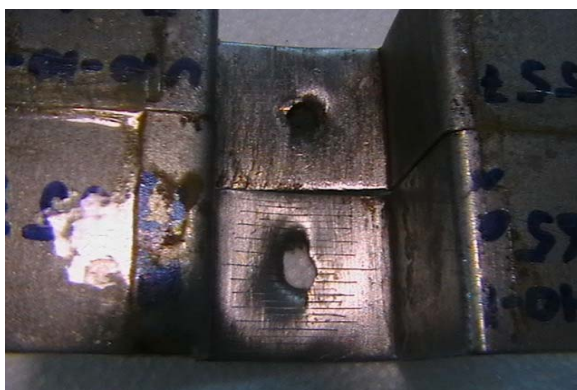
شکل ۸ نمودار بار بر حسب طول عمر خستگی برای نمونه‌های UA

شکل ۵، نمونه ۲-۱۵-۱۰ UB را نشان می‌دهد که ضخامت یکی از ورقها ۱ میلیمتر و دیگری ۱/۵ میلیمتر است و تحت تأثیر نیروی حداکثر برابر ۶۵۰ نیوتن قرار گرفته و ۱۵۹۲۲ دوره بارگذاری را تحمل کرده است. همانطور که مشاهده می‌شود قبل از آنکه ترک بتواند در آن رشد کند، ورق نازکتر (سمت چپ) دچار پارگی شده در حالی که ورق ضخیم‌تر هیچ آسیبی ندیده است.



شکل ۵ نحوه ایجاد زوال در دو ورق با ضخامت‌های ۱ و ۱/۵ میلیمتر هیچگونه ترکی مشاهده نمی‌گردد

شکل ۶ نمونه ۱-۱۰-۱۰ UB را نشان می‌دهد که ضخامت هر دو ورق ۱ میلیمتر است و تحت تأثیر نیروی حداکثر برابر ۶۵۰ نیوتن قرار گرفته است. همانطور که مشاهده می‌شود قبل از آنکه ترک به طور قابل توجهی در ورقها رشد کند، هر دو ورق به دلیل نازک بودن، دچار پارگی شده است.



شکل ۶ نحوه رشد ترک در ورقهای با ضخامت ۱ میلیمتر

جدول ۱ نتایج طول عمر خستگی برای نمونه‌های UA - شکل مقارن

طول نهایی ترک مشاهده شده در سطح نمونه (mm)	نوع شکست	نسبت بار (نسبت بار حداقل به بار حداکثر) R	$N_f$ تعداد دوره بارگذاری تا شکست نمونه	حداکثر نیروی اعمال شده (N)	نوع نمونه، U - شکل
۴	کنده شدن نقطه جوش	۰/۰۲	۱۳۳۵۲۵۵	۲۰۰	۱mm-۱mm
۲۵	کنده شدن نقطه جوش	۰/۰۲	۴۵۸۴۶۳	۳۵۰	
۲۳	کنده شدن نقطه جوش	۰/۰۴	۱۱۶۳۳۵	۵۰۰	
۱۱/۵	کنده شدن نقطه جوش	۰/۰۲	۱۷۵۵۷	۶۵۰	
۶	کنده شدن نقطه جوش	۰/۰۲	۱۳۳۵۰۰۰	۲۰۰	۱mm-۱/۵mm
۱۸	کنده شدن نقطه جوش	۰/۰۲	۳۳۳۱۸۲	۳۵۰	
۱۸	کنده شدن نقطه جوش	۰/۰۲	۶۰۹۳۳	۵۰۰	
۷/۵	شکست نقطه جوش	۰/۰۱	۱۳۵۴۹	۶۵۰	
۲۵	کنده شدن نقطه جوش	۰/۰۱	۱۴۳۴۰۰۰	۵۰۰	۱/۵mm-۱/۵mm
۱۵	کنده شدن نقطه جوش	۰/۰۱	۳۴۲۸۸۱	۶۵۰	
۱۸/۵	کنده شدن نقطه جوش	۰/۰۱	۱۵۶۵۹۲	۸۰۰	
۱۰/۵	کنده شدن نقطه جوش	۰/۰۱	۱۱۳۴۳۵	۹۰۰	

گروه UA

جدول ۲ نتایج طول عمر خستگی برای نمونه‌های UB - شکل متقارن

طول نهایی ترک مشاهده شده در سطح نمونه (mm)	نوع شکست	نسبت بار (نسبت بار حداقل به بار حداکثر) R	$N_f$ تعداد دوره بارگذاری تا شکست نمونه	حداکثر نیروی اعمال شده (N)	نوع نمونه، U - شکل
۶/۵	کنده شدن نقطه جوش	۰/۰۲	۱۳۰۸۸۱۶	۲۰۰	گروه UB
۲۵	کنده شدن نقطه جوش	۰/۰۲	۳۲۵۸۹۰	۳۵۰	
۸/۵	کنده شدن نقطه جوش	۰/۰۲	۵۳۷۶۶	۵۰۰	
-	-	-	-	-	
۱۰	کنده شدن نقطه جوش	۰/۰۲	۱۲۳۸۹۰۰	۲۷۵	
۲۰	شکست نقطه جوش	۰/۰۰۴	۴۶۰۱۳۵	۳۵۰	
۱۱	کنده شدن نقطه جوش	۰/۰۱	۵۸۳۳۸	۵۰۰	
۸	کنده شدن نقطه جوش	۰/۰۰۵	۱۵۹۲۲	۶۵۰	
۲/۵	شکست نقطه جوش	۰/۰۱	۱۱۹۹۳۴۶	۵۰۰	
۷	شکست نقطه جوش	۰/۰۱	۵۸۴۲۴۳	۶۵۰	
۸	شکست نقطه جوش	۰/۰۱	۲۴۰۴۱۱	۸۰۰	
۱۹	کنده شدن نقطه جوش	۰/۰۱	۲۰۲۷۳۰	۹۰۰	

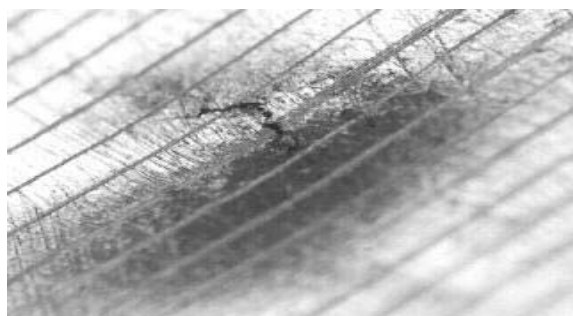


به راحتی قابل اندازه گیری باشد، بر روی سطح نمونه ها با استفاده از کولیس دقیق، خطوطی به فاصله ۱ میلیمتر از یکدیگر ایجاد شد.

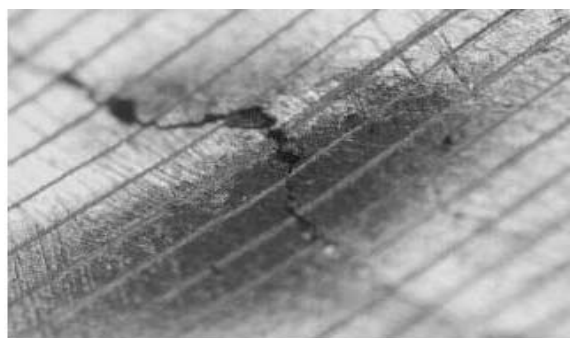
در شکل های ۱۱ و ۱۲ چند نمونه از تصاویر رشد ترک بر روی سطح نمونه به ازای تعداد مختلف دوره بارگذاری نشان داده شده است.

### ۳-۳- بررسی رفتار رشد ترک خستگی نسبت به تعداد دوره بارگذاری

در شکل های ۱۳ تا ۱۷، نمودارهای طول ترک بر حسب تعداد دوره بارگذاری و رابطه آنها و همچنین فرمول رشد ترک خستگی بر حسب تعداد دوره بارگذاری برای بعضی از نمونه ها آورده شده است.



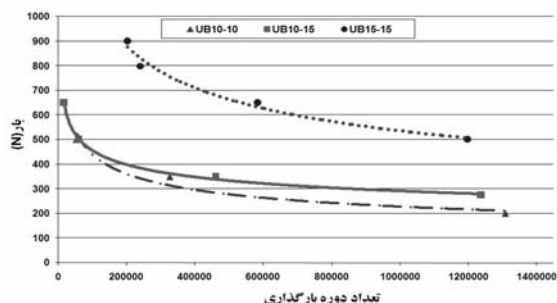
تعداد دوره بارگذاری = ۱۳۶۵۰۰۰



تعداد دوره بارگذاری = ۱۴۰۰۰۰۰

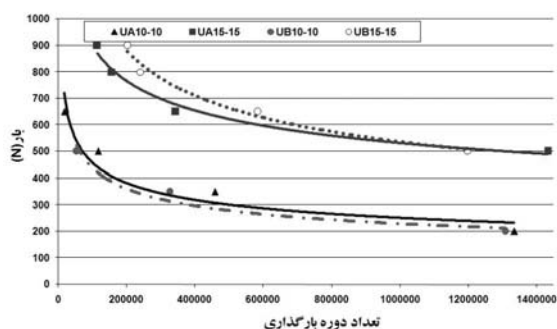
شکل ۱۱ تصاویر نمونه ۱-۱۵-۱۵ UA حین بارگذاری

در شکل ۹، نمودار بار بر حسب عمر خستگی برای بعضی از نمونه های UB ارائه شده است.



شکل ۹ نمودار بار بر حسب طول عمر خستگی برای نمونه های UB

در شکل ۱۰، مقایسه ای بین طول عمر خستگی برای بعضی از نمونه های UA و UB ارائه شده است.

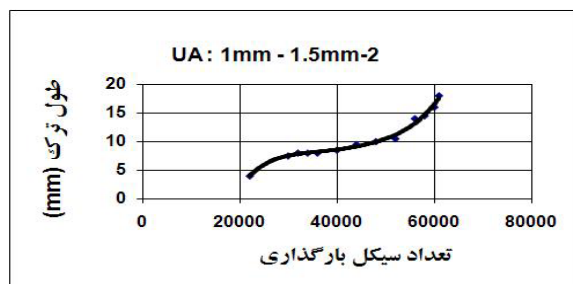


شکل ۱۰ مقایسه طول عمر خستگی برای بعضی از نمونه های UA و UB

### ۳-۲- اندازه گیری رشد ترک خستگی

همزمان با انجام آزمایشها، سطح نمونه با استفاده از میکروسکوپ NIKON SMZ-1 با بزرگنمایی ۱۰۰ و به وسیله دوربین دیجیتالی به صورت تصویری بررسی می شد. برای اینکه بتوان رشد ترک را با وضوح بیشتری مشاهده کرد، سطح تمامی قطعات در اطراف جوش نقطه ای با استفاده از سمباده درشت و نرم صیقلی شد. همچنین برای آنکه در طول بارگذاری، طول ترک





$$a = 2/626e^{2E-0.5N}$$

$$da/dN = 7/86e^{2E-0.5N}$$

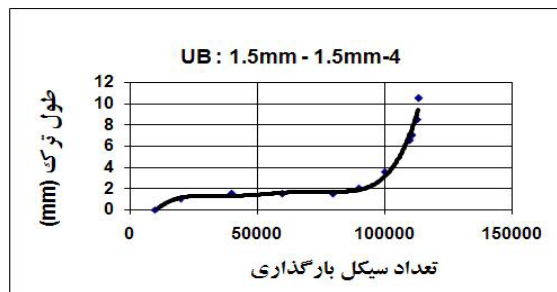
شکل ۱۳ نمودار طول ترک بر حسب تعداد دوره بارگذاری و رابطه آن برای نمونه UA ۱۰-۱۵-۲



تعداد دوره بارگذاری = ۲۳۰۰۰۰



تعداد دوره بارگذاری = ۲۶۰۰۰۰



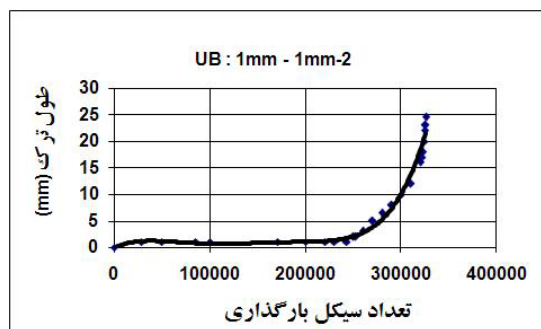
$$a = 5E-12N^2 - 2E-08N^2 + 0/000N - 3/923$$

$$da/dN = 15E-12N^2 - 6E-08N$$

شکل ۱۴ نمودار طول ترک بر حسب تعداد دوره بارگذاری و رابطه آن برای نمونه UA ۱۵-۱۵-۴



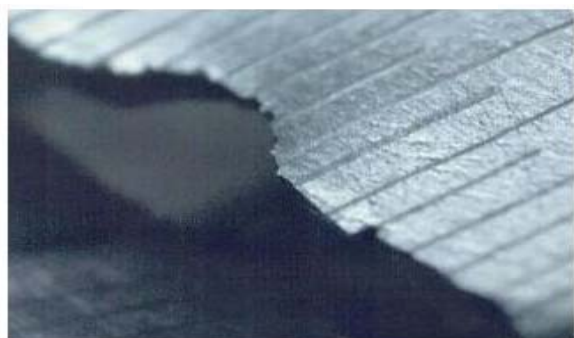
تعداد دوره بارگذاری = ۳۰۰۰۰۰



$$a = 2E-14N^2 - 2E-09N^2 + 9E-05N - 0/123$$

$$da/dN = 6E-14N^2 - 4E-09N - 9E-05$$

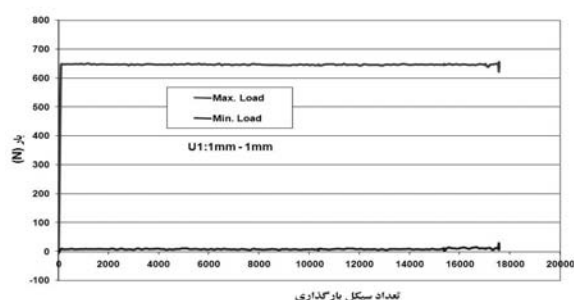
شکل ۱۵ نمودار طول ترک بر حسب تعداد دوره بارگذاری و رابطه آن برای نمونه UB ۱۰-۱۰-۲



تعداد دوره بارگذاری = ۳۲۵۸۹۰

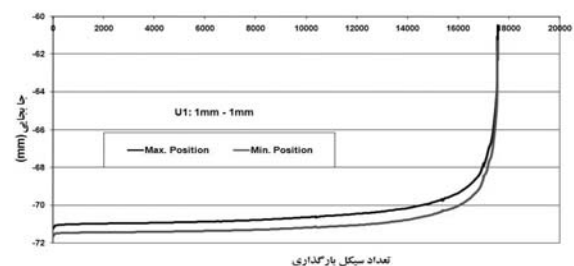
شکل ۱۲ تصاویر نمونه UB ۱۰-۱۰-۲ در حین بارگذاری

ترسیم کنیم، نقطه‌ای که در آن شیب نمودار از مقداری تقریباً صفر به مقداری مثبت افزایش می‌یابد، نقطه شروع انتشار ترک است. این موضوع در شکل‌های ۱۸ تا ۲۶ تا آورده شده است. (شکل ۱۸-الف)، محدوده بارگذاری بر روی نمونه را نشان می‌دهد که در آن مقدار بار حداکثر و حداقل مشخص شده است. این نوع بارگذاری برای کلیه نمونه‌ها اما برای نیروهای مختلف انجام شده است. همچنین در تمامی شکل‌های ۱۸ تا ۲۶، نمودارهای مربوط به تغییرات سفتی آورده شده که در آنها تغییر در شیب منحنی جابه‌جایی - تعداد دوره بارگذاری، نشان‌دهنده تغییر در سفتی نمونه است. به‌عنوان مثال در شکل ۱۹، حداکثر مقدار بار اعمال شده برابر  $350\text{N}$  است و با توجه به (شکل ۱۹-ب)، شروع انتشار ترک تقریباً در ۹۰۰۰ دوره بارگذاری بوده است.



شکل ۱۶ نمودار بار - تعداد دوره بارگذاری برای نمونه

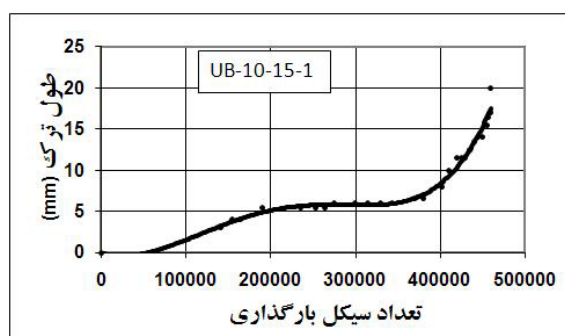
$$P_{\max} = 650\text{N}, UA10-10-1$$



شکل ۱۷ نمودار طول ترک بر حسب تعداد دوره بارگذاری و

$$P_{\max} = 650\text{N}, UA10-10-1 \text{ (شروع انتشار ترک تقریباً در ۴۰۰۰ سیکل)}$$

شکل ۱۸ جابه‌جایی - تعداد دوره بارگذاری برای نمونه UA10-10-1

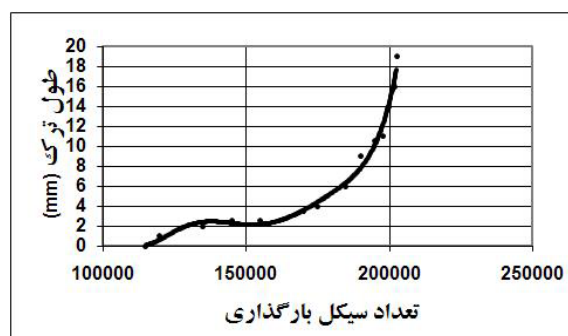


$$a = 7E-10 \cdot N^2 - 2E-05 \cdot N - 0.006$$

$$da/dN = 14E-10 \cdot N - 2E-05$$

شکل ۱۶ نمودار طول ترک بر حسب تعداد دوره بارگذاری و

$$\text{رابطه آن برای نمونه UB10-15-1}$$



$$a = 1E-13 \cdot N^2 - 4E-08 \cdot N^2 + 0.006 \cdot N - 2.09/8$$

$$da/dN = 2E-13 \cdot N^2 - 8E-08 \cdot N + 0.006$$

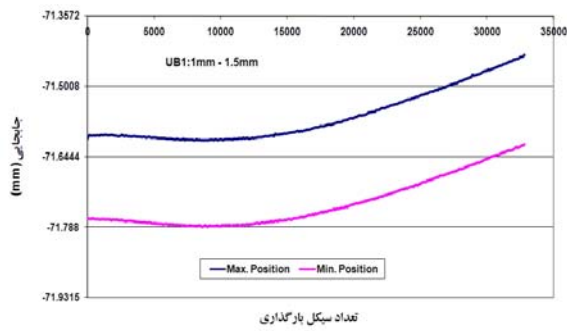
شکل ۱۷ نمودار طول ترک بر حسب تعداد دوره بارگذاری و

$$\text{رابطه آن برای نمونه UB15-15-4}$$

#### ۴- پیش‌بینی شروع انتشار ترک خستگی

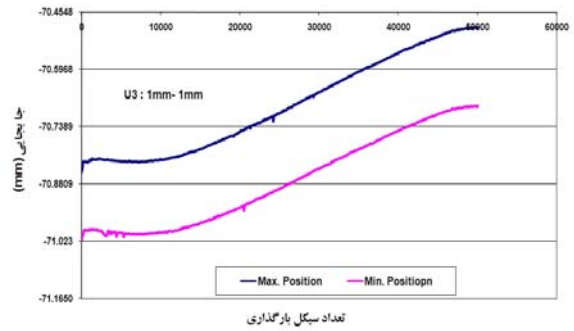
هر نمونه قبل از شروع ترک دارای سفتی<sup>۱</sup> مشخصی است. پس از شروع ترک و رشد آن، سفتی نمونه تغییر می‌یابد، به‌طوری‌که هر چه طول ترک بیشتر می‌شود، سفتی نمونه کاهش می‌یابد. لذا از روی این خاصیت نمونه‌ها می‌توان شروع انتشار ترک خستگی را اندازه گرفت. اگر نمودارهای جابه‌جایی عمودی نمونه‌ها بر حسب تعداد دوره بارگذاری را

1. Stiffness



تعداد سیکل بارگذاری

شکل ۲۲ نمودار جابه‌جایی - تعداد دوره بارگذاری برای نمونه UB1-۱۰-۱۵-۱،  $P_{max}=350N$  (شروع انتشار ترک تقریباً در ۱۲۵۰۰ سیکل)



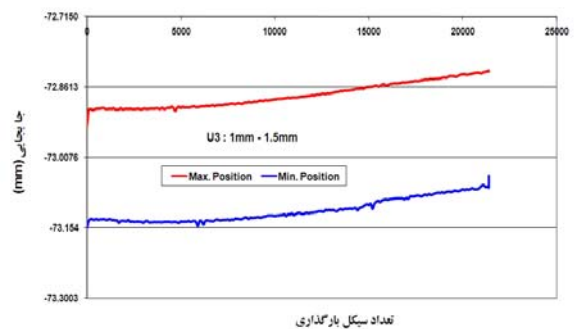
تعداد سیکل بارگذاری

شکل ۱۹ نمودار جابه‌جایی - تعداد دوره بارگذاری برای نمونه UA1۰-۱۰-۳،  $P_{max}=350N$  (شروع انتشار ترک تقریباً در ۹۰۰۰ سیکل)



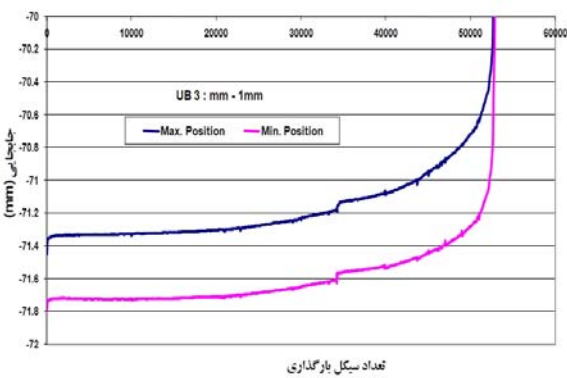
تعداد سیکل بارگذاری

شکل ۲۳ نمودار جابه‌جایی - تعداد دوره بارگذاری برای نمونه UB1۵-۱۵-۲،  $P_{max}=650N$  (شروع انتشار ترک تقریباً در ۸۰۰۰ سیکل)



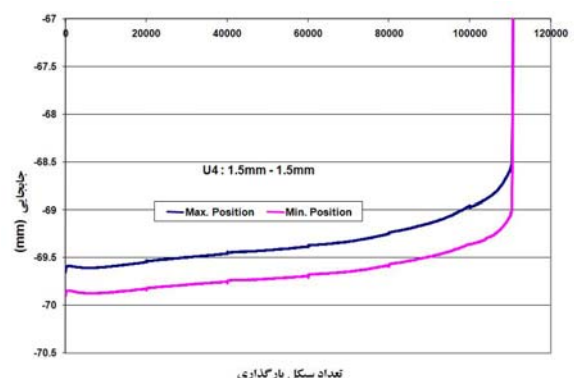
تعداد سیکل بارگذاری

شکل ۲۰ نمودار جابه‌جایی - تعداد دوره بارگذاری برای نمونه UA1۰-۱۵-۳،  $P_{max}=350N$  (شروع انتشار ترک تقریباً در ۶۰۰۰ سیکل)



تعداد سیکل بارگذاری

شکل ۲۴ نمودار جابه‌جایی - تعداد دوره بارگذاری برای نمونه UB1۰-۱۰-۳،  $P_{max}=500N$  (شروع انتشار ترک تقریباً در ۱۲۰۰۰ سیکل)



تعداد سیکل بارگذاری

شکل ۲۱ نمودار جابه‌جایی - تعداد دوره بارگذاری برای نمونه UA1۵-۱۵-۴،  $P_{max}=900N$  (شروع انتشار ترک تقریباً در ۱۵۰۰۰ سیکل)

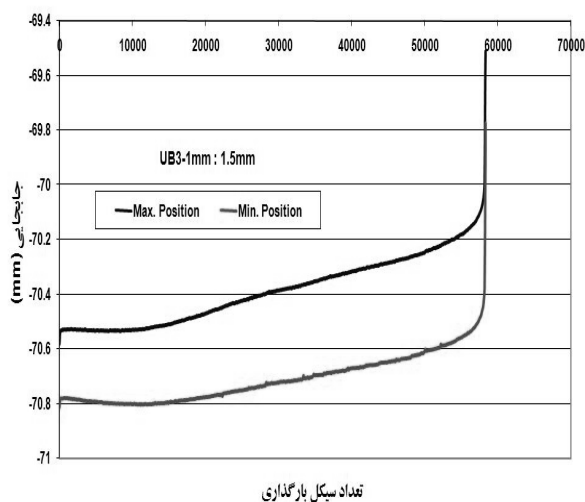
رشد ترک در بین ضخامت ورقه مشاهده می‌شود (تا زمان قابل رؤیت شدن ترک در سطح نمونه که معمولاً زمانی قابل مشاهده بود که طولی در حدود ۲ میلیمتر داشت). با توجه به نتایج مشخص می‌شود که در نمونه‌های با طول عمر زیاد (بار اعمال شده کم) مرحله جوانه‌زنی و رشد ترک بیشتر از نیمی از طول عمر نهایی را شامل می‌شود؛ این در حالی است که در نمونه‌های با طول عمر کم (بار اعمال شده زیاد)، مراحل جوانه‌زنی و رشد ترک تا سطح، به‌طور میانگین در حدود ۴۰ درصد از عمر نهایی نمونه‌ها را تشکیل می‌دهد.

۲- ترک‌ها به‌صورت کاملاً رشد یافته و ناگهانی به سطح خارجی می‌رسند، به‌طوری‌که اندازه‌گیری ترک‌های ریز (کمتر از ۲mm) با استفاده از ابزار ممکن نیست. به‌طور کلی ترک‌ها وقتی در سطح خارجی نمایان می‌شوند، طولی در حدود ۲/۵-۴mm داشتند.

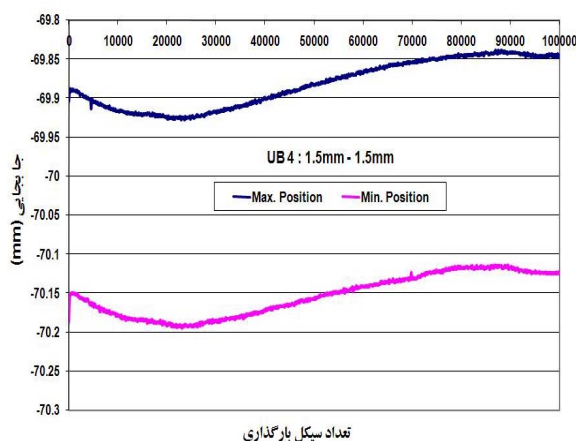
۳- محل ترک‌ها در سطح خارجی، در دور دکمه جوش و در سمت لبه عمودی است.

۴- از جدول ۳ می‌توان به رابطه نوع شکست با طول عمر پی برد. به‌طور کلی هر چه طول عمر بیشتر باشد، شکست به‌صورت ناگهانی و از نوع شکست دکمه جوش خواهد بود.

۵- در تمامی منحنی‌های جابه‌جایی بر حسب تعداد دوره بارگذاری، در تعداد پایین دوره، شیب منحنی، تقریباً ثابت و نزدیک به صفر است. اما پس از تعدادی دوره بارگذاری - که برای هر نمونه با توجه به ضخامت و بارگذاری آن متفاوت است - شیب منحنی تغییر کرده و افزایشی می‌شود، که در واقع این نقطه را می‌توان تقریباً همان نقطه‌ای دانست که جوانه‌زنی ترک شروع شده است.



شکل ۲۵ نمودار جابه‌جایی - تعداد دوره بارگذاری برای نمونه UB۱۰-۱۵-۳،  $P_{max}=500N$  (شروع انتشار ترک تقریباً در ۱۲۰۰۰ سیکل)



شکل ۲۶ نمودار جابه‌جایی - تعداد دوره بارگذاری برای نمونه UB۱۵-۱۵-۴،  $P_{max}=900N$  (شروع انتشار ترک تقریباً در ۲۵۰۰۰ سیکل)

## ۵- بحث و بررسی نتایج

۱- در جدول ۳ طول عمر ترک در مراحل جوانه‌زنی و

جدول ۳ طول عمر ترک در مرحله جوانه‌زنی و رشد تا قابل رؤیت شدن ترک بر روی سطح نمونه

$\frac{N_C}{N_t} \times 100$	$N_t$ ، عمر نهایی	$N_C$ ، تعداد دوره‌ای که ترک در سطح نمونه مشاهده شد	حداکثر بار اعمال شده (N)	نوع نمونه، U - شکل	
۹۹	۱۳۳۵۲۵۵	۱۳۲۰۰۰۰	۲۰۰	۱mm- ۱mm	گروه UA
۵۰	۴۵۸۴۶۳	۲۳۰۰۰	۳۵۰		
-	۱۱۶۳۳۵	-	۵۰۰		
۵۷	۱۷۵۵۷	۱۰۰۰۰	۶۵۰		
۹۳	۱۳۳۵۰۰۰	۱۲۴۰۰۰۰	۲۰۰	۱mm- ۱/۵mm	
۸۳	۳۳۳۱۸۲	۲۷۵۰۰۰	۳۵۰		
۳۳	۶۰۹۳۳	۲۰۰۰	۵۰۰		
۵۲	۱۳۵۴۹	۷۰۰۰	۶۵۰		
۴۵	۱۴۳۴۰۰۰	۶۵۰۰۰۰	۵۰۰	۱/۵mm-۱/۵mm	
۷۴	۳۴۲۸۸۱	۲۵۵۰۰۰	۶۵۰		
۳۲	۱۵۶۵۹۲	۵۰۰۰۰	۸۰۰		
۱۸	۱۱۳۴۳۵	۲۰۰۰۰	۹۰۰		
۸۲	۱۳۰۸۸۱۶	۱۰۷۵۳۶۴	۲۰۰	۱mm- ۱mm	گروه UB
۶۸	۳۲۵۸۹۰	۲۲۰۰۰۰	۳۵۰		
۷۴	۵۳۷۶۶	۳۹۸۸۳	۵۰۰		
-	-	-	۶۵۰		
۶۹	۸۵۵۰۰۰	۱۲۳۸۹۰۰	۲۷۵	۱mm- ۱/۵mm	
۲۸	۴۶۰۱۳۵	۱۳۰۰۰۰	۳۵۰		
۳۴	۵۸۳۳۸	۲۰۰۰۰	۵۰۰		
۴۴	۱۵۹۲۲	۷۰۰۰	۶۵۰		
۹۹	۱۱۹۹۳۴۶	۱۱۹۰۰۰۰	۵۰۰	mm۵/۱mm-۵/۱	
۹۱	۵۸۴۲۴۳	۵۳۰۰۰۰	۶۵۰		
۹۴	۲۴۰۴۱۱	۲۲۵۰۰۰	۸۰۰		
۵۹	۲۰۲۷۳۰	۱۲۰۰۰۰	۹۰۰		

## ۶- نتیجه گیری

به طور کلی از بررسی و مشاهده سطوح و مقاطع شکست نتایج زیر حاصل می شود:

۱- در نمونه های با ضخامت متفاوت، ترک همواره در ورقه نازک شروع می شود. همچنین این ورق نازک است که در نهایت دچار شکست می شود.

۲- در نمونه های با ضخامت یکسان، ترک در هر دو ورق با طولی تقریباً یکسان ایجاد می شود.

۳- ترک به دلیل تمرکز تنش ایجاد شده در محیط نقطه جوش، به صورت کمّانی شکل در اطراف دکمه جوش رشد می کند و شکست معمولاً در ورق اتفاق می افتد تا در نقطه جوش.

۴- بخش عمده ای از طول عمر خستگی نقطه جوشها صرف جوانه زنی و رشد ترک تا سطح نمونه می شود.

۵- عمر بعضی از نمونه ها در مقایسه با دیگر نمونه های مشابه، کمتر از حد قابل انتظار بود. با بررسی های انجام شده، دلیل این امر کم بودن قطر الکتروود در هنگام جوشکاری برای آنها تشخیص داده شد، که باعث کیفیت نامطلوب جوش شده بود.

۶- با توجه به نمودار بار بر حسب طول عمر خستگی به نکات زیر می توان اشاره کرد:

۷- همانطور که از نتایج به دست آمده پیدا است، هر قدر که سطح بارگذاری بیشتر می شود، طول عمر خستگی نمونه ها کاهش می یابد.

الف) بیشترین دوام خستگی مربوط به نمونه های همسان با ضخامت ورقه ۱/۵ میلیمتر (۱-۱۵-۱۵-UA) (در بار ۵۰۰ نیوتن، تعداد دوره نهایی ۱۴۳۴۰۰۰) و کمترین دوام خستگی مربوط به نمونه های یکسان با ضخامت ورقه ۱ میلیمتر که دارای قطر دکمه جوش ۴

میلیمتر است (نمونه های ۱۰-۱۰-UB)، (در بار ۵۰۰ نیوتن، تعداد دوره بارگذاری نهایی ۵۸۳۳۸) است.

ب) با توجه به نتایج تجربی مشخص می شود که استفاده از جوشهای نقطه ای با ضخامت متفاوت، تغییر چشمگیری در طول عمر خستگی آنها ایجاد نمی کند. یعنی اگر ورق با ضخامت ۱ میلیمتر به ورقهای دیگری به ترتیب با ضخامت های ۱ میلیمتر و ۲ میلیمتر جوش نقطه ای شود، طول عمر خستگی آنها تفاوت زیادی نمی کند؛ زیرا در هر حالت، شکست در ورق با ضخامت کمتر (۱ میلیمتر) اتفاق می افتد.

۸- تحقیقات دیگری که در این زمینه می توان انجام داد عبارت است از:

الف) بررسی طول عمر خستگی نقطه جوشها تحت اثر بارگذاری تصادفی یا بارهای ضربه ای؛

ب) انجام آزمایشهایی بر روی قطعات واقعی تر با هندسه و بارگذاری پیچیده تر؛

ج) انجام آزمایشهایی بر روی نمونه هایی با جنس بدنه خودروها.

## ۷- منابع

- [1] Zhang, S., "Approximate stress intensity factors and notch stress for common spot-welded specimens". *Welding Research Supplement* 78, 1999, 173s-179s.
- [2] Hartmann, E. C. "Mechanical tests of spot welds". *Welding Journal* 37, 1958. 520-523.
- [3] Davidson, J. A., "A review of the fatigue properties of spot-welded sheet steels".

- by volumetric method". *Int J Fatigue* 2004; 26:81–94.
- [10] Xin Sun, Elizabeth V. Stephens, Mohammad A. Khaleel, "Effects of Fusion Zone Size and Failure Mode on Peak Load and Energy Absorption of Advanced High Strength Steel Spot Welds under Lap Shear Loading Conditions", *Engineering Failure Analysis*, Accepted Date: 22 January 2007.
- [11] Xin Long, Sanjeev K. Khanna, "Fatigue properties and failure characterization of spot welded high strength steel sheet", *International Journal of Fatigue* 29, 2007 879–886.
- [12] Byoung-Ho Choi a, Dong-Ho Joo b, Sam-Hong Song, "Observation and prediction of fatigue behavior of spot welded joints with triple thin steel plates under tensile-shear loading", *International Journal of Fatigue* 29,2007, 620–627
- [13] S. -H. Lin a, J. Pan a, P. Wung b, J. Chiang, "A fatigue crack growth model for spot welds under cyclic loading conditions", *International Journal of Fatigue* 28, 2006, 792–803.
- [14] Ning Pan \*, Sheri Sheppard, "Spot welds fatigue life prediction with cyclic strain SAE Technical Paper No. 830033, Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pennsylvania. 1983.
- [4] Radaj, D. "Stress singularity, notch stress and structural stress at spot-welded joints". *Engineering Fracture Mechanics* 34, 1989, 495–506.
- [5] Wang, P.- C. Ewing, K. W., "Fracture mechanics analysis of fatigue resistance of spot welded coach-peel joints". *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures* 14, 1991., 913–930.
- [6] Swellam, M. H., Banas, G., Lawrence, F. V., 1994. "A fatigue design parameter for spot welds". *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures* 17, 1197–1204.
- [7] Sheppard, S. D., Pan, N. "A look at fatigue: is resistance spot welds-notch or crack?" SAE Technical Paper No. 2001-01-0433, Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pennsylvania. 2001.
- [8] Zhang, S. "Recent developments in analysis and testing of spot welds". SAE Technical Paper No. 2001-01-0432, Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pennsylvania. 2001.
- [9] Adib H, Gilgert J, Pluvinage G. "Fatigue life duration prediction for welded spots



- [16] P. C. Lin, S. H. Lin, J. Pan, "Modeling of failure near spot welds in lap-shear specimens based on a plane stress rigid inclusion analysis", *Engineering Fracture Mechanics* 73, 2006, 2229–2249.
- [15] Hong Tae Kang, "Fatigue prediction of spot welded joints using equivalent structural stress", *Materials and Design*, 2005.
- range", *International Journal of Fatigue* 24, 2002, 519–528.

