



# بررسی عددی و تجربی تاثیر سرعت ابزار بر رشد ترک خستگی در اتصالات جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم 2024-T351

علی رستگار<sup>1</sup>، دانیال قهرمانی مقدم<sup>2</sup>، خلیل فرهنگدوست<sup>3</sup>، مسعود طهانی<sup>4</sup>

- 1- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد
  - 2- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد
  - 3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد
  - 4- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد
- \* مشهد، کدپستی 91775-1111، farhang@um.ac.ir

## اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 04 بهمن 1394  
پذیرش: 12 اردیبهشت 1395  
ارائه در سایت: 25 خرداد 1395  
کلید واژگان:

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی  
AA2024-T351  
رشد ترک خستگی  
شبیه‌سازی اجزا محدود  
سرعت دورانی و پیشروی ابزار

## چکیده

فرآیند جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی بر روی ورق‌های آلیاژ آلومینیوم 2024-T351 در سرعت‌های دورانی 400، 630 و 800 دور بر دقیقه و سرعت‌های پیشروی 8، 16 و 25 میلی‌متر بر دقیقه انجام شده است. پس از آن با استفاده از روش تست استاندارد ASTM-E647 نرخ رشد ترک خستگی در نمونه‌های CT مورد بررسی قرار گرفته است. پس از مدل‌سازی فرآیند جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی، رشد ترک خستگی بر مبنای روش XFEM، در نمونه‌ها شبیه‌سازی شده است. در این تحلیل جهت بررسی آسیب در نمونه، از معیار آسیب تنش بیشینه استفاده شده است و معیار شکست بیشترین تنش اصلی در المان است. مقایسه نتایج تجربی و عددی رشد ترک خستگی نشان دهنده قابل اعتماد بودن روش شبیه‌سازی می‌باشد. بررسی تجربی و عددی تاثیر سرعت جوش کاری بر نرخ رشد ترک خستگی در نمونه‌ها نشان می‌دهد، نرخ رشد ترک در تمامی نمونه‌های جوش کاری به ازای مقادیر پایین تغییرات ضریب شدت تنش ( $\Delta K \leq 13 \text{ MPa}$ ) کمتر از فلز پایه بوده و با افزایش تغییرات ضریب شدت تنش نرخ رشد ترک بسیار افزایش می‌یابد. همچنین نتایج نشان می‌دهند، نمونه‌های جوش کاری شده با سرعت‌های پایین‌تر خواص خستگی بهتری نسبت به فلز پایه دارند و افزایش سرعت دورانی و پیشروی ابزار نرخ رشد ترک خستگی را در نمونه‌ها افزایش می‌دهد.

## Numerical and experimental investigation of welding speed effect on fatigue crack growth in friction stir welded 2024-T351 aluminum alloy

Ali Rastegar, Danial Ghahremani Moghadam, Khalil Farhangdoost\*, Masoud Tahani

Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran  
\* P.O.B. 91775-1111, Mashhad, Iran, farhang@um.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 24 January 2016  
Accepted 01 May 2016  
Available Online 14 June 2016

#### Keywords:

Friction Stir Welding  
Aluminum Alloy 2024-T351  
Fatigue Crack Propagation  
Finite Element Method  
Tool Rotational and Traverse Speed

### ABSTRACT

Friction stir welded butt joints were performed on sheets made of AA2024-T351 aluminum alloy at tool rotational speeds of 400, 630, 800 rpm and traverse speeds of 8, 16, 25 mm/min. The fatigue crack propagation rate was investigated according to standard ASTM-E647 in CT specimens. FE simulation of FSW process was implemented for different welding conditions and next the fatigue crack propagation was simulated using XFEM method. In this analysis, to assess the damage in the joints, maximum stress criterion is used. The maximum principal stress in element was the fracture criterion. Numerical results are in good agreement with the experiments so the simulation is reliable. The obtained results show that the tool rotational and traverse speed affect the fatigues crack growth rate. For all welded specimens crack propagation rate was slower than that of the base metal for low values of  $\Delta K$  ( $\Delta K \leq 13 \text{ MPa}$ ) but is much faster at high values of  $\Delta K$ . Furthermore fatigue properties of specimens that were welded with lower speeds are better than base metal and increase in rotational or traverse speeds of the tool will increase the crack propagation rate of the welded specimens.

## 1- مقدمه

قابلیت تکرارپذیری، عدم نیاز به آماده‌سازی نمونه‌ها، انرژی مصرفی پایین و آلودگی کم این روش نسبت به سایر روش‌های سنتی اشاره نمود [2]. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی فرآیندی مناسب جهت اتصال آلیاژهای آلومینیوم با خواص جوش‌پذیری پایین و اتصال آلیاژهای غیرهمجنس

جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی روشی بر پایه حالت جامد می‌باشد که در سال 1991 در انجمن جوش کاری انگلستان ابداع شده است [1]. از مزیت‌های این روش جوش کاری می‌توان به اتصالات با کیفیت بالا، کنترل دقیق فرآیند،

Please cite this article using:

A. Rastegar, D. Ghahremani Moghadam, Kh. Farhangdoost, M. Tahani, Numerical and experimental investigation of welding speed effect on fatigue crack growth in friction stir welded 2024-T351 aluminum alloy, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 6, pp. 91-100, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

می باشد [3]. برخلاف روش های سنتی جوش کاری، در این روش جوش کاری تغییر شکل و اتصال مواد در دمای زیر نقطه ذوب اتفاق می افتد و مشکلاتی مانند اعوجاج و تنش های پسماند کاهش می یابد. با توجه به موارد اشاره شده کاربرد فناوری جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی جهت اتصال آلیاژهای آلومینیوم در بسیاری از صنایع مانند اتومبیل سازی، هوافضا، کشتی سازی و راه آهن توسعه فراوانی یافته است [4].

به دلیل پیچیدگی پارامترهای افزایش دما، تغییر شکل پلاستیک، جریان مواد و تغییرات ریزساختار در حین فرآیند جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی، شناخت تاثیر پارامترهای جوش کاری بر خواص مکانیکی اتصالات ایجاد شده با این روش، جهت ایجاد اتصالات با خواص بهتر ضروری است. یکی از خواص مکانیکی مهم در اجزای جوش کاری شده، خواص شکست و خستگی می باشد که در حالت وجود ترک یا میکرو ترک و یا بارگذاری متناوب، بررسی این خواص در اجزای جوش کاری شده باید به عنوان یک موضوع مهم مورد توجه قرار گیرد.

در جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی، سطح هموار اتصالات جوش کاری شده، مقادیر پایین تنش های پسماند، عدم استفاده از ماده پرکننده در فرآیند جوش، احتمال پایین تشکیل خلل و فرج، دانه بندی مناسب و ساختار دانه های هم محور باعث شده است تا خواص شکست و خستگی قطعات جوش کاری شده با این روش به طور چشمگیری نسبت به روش های سنتی جوش کاری افزایش یابد [5,6].

برخلاف روش های سنتی جوش کاری که دارای استانداردهایی جهت بررسی خواص شکست و خستگی اتصالات جوش کاری شده با این روش ها می باشد، استاندارد جهت ارائه خواص شکست و خستگی اتصالات جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی وجود ندارد؛ بنابراین این موضوع در سال های اخیر به عنوان یک مبحث مهم مورد توجه محققین قرار گرفته است تا با استفاده از روش های تجربی و عددی مناسب خواص شکست و خستگی این اتصالات را ارائه نمایند. علاوه بر این پارامترهای متفاوت جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی بر خواص شکست و خستگی این اتصالات تاثیرگذار خواهند بود. به منظور بهبود این خواص باید تاثیر این پارامترها بر خواص شکست و خستگی مورد بررسی قرار گیرد.

در سال های اخیر مطالعاتی بر روی عمر خستگی و همچنین رشد ترک در اتصالات جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی انجام شده است؛ اما این موضوع به دلیل نبودن این روش جوش کاری و پیچیدگی مقاومت خستگی همچنان به عنوان یک مبحث مهم در تحقیقات مورد توجه قرار می گیرد. همچنین مطالعاتی جهت شناخت تاثیر پارامترهای جوش کاری بر خواص خستگی اتصالات جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی انجام شده است. برخی مطالعات نشان می دهند که مقاومت خستگی این اتصالات به طور کلی پایین تر از فلز پایه است، زیرا ناحیه جوش کاری مستعد جوانه زنی و رشد ترک می باشد؛ اما در برخی موارد نیز عمر خستگی اتصالات جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی قابل مقایسه با فلز پایه است [7,8]. همچنین نشان داده شده است که مقاومت خستگی اتصالات جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی بالاتر از اتصالات جوش کاری شده به روش های دیگری مانند MIG و جوش لیزر می باشد [9,7]. ریزساختار بهتر دانه ها در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی باعث بالاتر بودن عمر خستگی آن نسبت به سایر روش های جوشکاری است.

جیمز و همکاران [10] تاثیر پارامترهای فرآیند و عیوب جوش کاری را بر رفتار خستگی اتصالات جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم 5083

بررسی نمودند. با بررسی نتایج آن ها می توان دریافت که حد عمر خستگی (به ازای  $10^7$  سیکل) به طور کلی در نمونه های جوش کاری، با افزایش سرعت خطی جوش کاری (از 80 به 200 mm/min)، کاهش می یابد. نمونه های جوش کاری در دو حالت ماشین کاری شده و بدون ماشین کاری مورد بررسی قرار گرفتند؛ کاهش عمر خستگی با افزایش سرعت دورانی برای نمونه های ماشین کاری شده با توجه به خواص سطحی بهتر 11% و برای نمونه های ماشین کاری نشده 19% است. همچنین عیوب پوست پیزی<sup>1</sup> که در سطح قطعات جوشکاری به وجود می آیند عامل افزایش سرعت رشد ترک و شکست سریع تر در نمونه های ماشین کاری نشده می باشد؛ این عیوب تاثیری در جوانه زنی ترک خستگی ندارند. پوگت و رینولدز [11] رفتار رشد ترک خستگی در اتصالات جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم 2050 را بررسی نموده و رابطه ای دقیق بین نرخ رشد ترک و تنش پسماند یافتند. در مقادیر پایین تغییرات ضریب شدت تنش ( $\Delta K$ ) ریزساختار متبلور ناحیه ناگت بر رفتار رشد ترک خستگی تاثیرگذار است. آن ها همچنین توانستند با استفاده از یک مدل تحلیلی تجربی<sup>2</sup> نرخ رشد ترک را با استفاده از ضریب شدت تنش موثر ( $\Delta K_{eff}$ )، پیش بینی کنند. گلستانه و همکاران [12] نیز با استفاده از مدل های خستگی والکر [13] و نیکولز [14]، رشد ترک خستگی را با در نظر گرفتن تاثیر تنش پسماند در اتصالات جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم 2024-T351 مدل سازی نمودند. بوسو و ایروین [7] تاثیر تنش های پسماند جوش کاری را بر رشد ترک بررسی نمودند. آن ها نشان دادند که رفتار رشد ترک در اتصالات جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی به طور کلی متاثر از تنش های پسماند بوده و تغییرات ریزساختار و سختی تاثیر کمی بر آن دارند. همچنین فراتینی و همکاران [15] نیز تاثیر تنش های پسماند جوش کاری را بر رشد ترک بررسی نمودند. نتایج آن ها نشان می دهد که نرخ رشد ترک در خارج از ناحیه جوش کاری متاثر از تنش های پسماند بوده و در ناحیه جوش کاری متاثر از تغییرات ریزساختار و سختی است. کیم و همکاران [16] رفتار خستگی نمونه های جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی و جوش کاری قوس فلزی گازی<sup>3</sup> را بررسی نموده و دریافتند نمونه های جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی به یكدیگر متصل شده اند مطالعه نمودند. آن ها همچنین با بررسی تاثیر پارامترهای جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی دریافتند که با افزایش سرعت خطی و دورانی ابزار مقاومت خستگی کاهش می یابد. علاوه بر آن افزایش زاویه گوه ای ابزار باعث بهتر شدن مقاومت خستگی خواهد شد. موریرا و همکاران [17] رفتار خستگی را در ورق های آلیاژی 6082-T6 و 6061-T6 به ضخامت 3 میلی متر که به روش های جوش کاری با گاز بی اثر (MIG) و اصطکاکی اغتشاشی به یكدیگر متصل شده اند مطالعه نمودند. آن ها برای جوش کاری آلیاژهای متفاوت از ابزار با ابعاد متفاوت و با سرعت خطی و دورانی و زاویه گوه ای یکسان استفاده نمودند. نتایج آن ها نشان می دهد که در اتصالات جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی خواص مکانیکی بهتر و خواص مقاومت خستگی بالاتر است. علاوه بر آن آلیاژ 6061-T6 عمر خستگی کمتری نسبت به آلیاژ 6082-T6 دارد. آن ها با استفاده از تصاویر SEM<sup>4</sup> فاصله خطوط خستگی<sup>5</sup> را در طول ترک های متفاوت اندازه گیری نمودند که با استفاده از آن می توان نرخ رشد ترک خستگی را تخمین زد. سیرلو و همکاران [18] تاثیر پارامترهای جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی مانند سرعت

<sup>1</sup> Onion Skin

<sup>2</sup> Empirical

<sup>3</sup> Gas Metal Arc Welding

<sup>4</sup> Scanning Electron Microscopy

<sup>5</sup> Fatigue Striation Spacing

گسترش ترک در اتصالات جوش کاری را برای تعداد المان‌های زیاد با استفاده از نرم‌افزار تحلیل شکست<sup>1</sup> انجام دادند. رشد ترک خستگی در اتصالات جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم 2024-T351 با استفاده از روش اجزا محدود و المان‌های مرزی دوگانه<sup>2</sup> توسط کارلون و همکاران [27] انجام شده است؛ نتایج عددی به‌دست‌آمده تطابق مناسبی با نتایج تجربی دارد. آن‌ها همچنین تاثیر سرعت جوش کاری را بر رشد ترک بررسی نمودند؛ نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که تنش‌های پسماند فشاری در حالتی که ترک به‌اندازه کافی از خط جوش دور بوده و سرعت خطی جوش کاری بالا باشد، تاثیر بسیاری بر رشد ترک دارد و همچنین اگر ترک اولیه در ناحیه ناگت قرار داشته باشد تاثیر سرعت خطی جوش کاری بر رشد ترک برعکس خواهد بود. حسنی‌فرد و پرغازه [28] مسیر رشد ترک را در آزمایش خمش چهار نقطه‌ای اتصالات جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی مس و آلومینیوم 7075-T6 پیش‌بینی نموده و سپس عمر خستگی در این اتصالات را به روش عددی و تجربی تخمین زدند. آن‌ها با استفاده از معیارهای تنش مماسی بیشینه و زاویه انتشار ترک پیش‌بینی شده و نیز با استفاده از رابطه‌ی پاریس، عمر ترک خستگی را تخمین زدند.

با وجود تحقیقات انجام گرفته، نیاز به مطالعات بیشتری در زمینه تاثیر پارامترهای جوش کاری بر رشد ترک خستگی در اتصالات جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی احساس می‌شود. به‌طور مثال تاکنون تاثیر سرعت دورانی و خطی ابزار جوش کاری بر رشد ترک خستگی، به‌طور مستقیم در تحقیقات مورد توجه قرار نگرفته است. همچنین در برخی موارد روش تجربی جهت تعیین پارامترهای خستگی در اتصالات جوش کاری، پرهزینه، زمان‌بر و بدون دقت کافی می‌باشد. با توجه به این محدودیت‌ها، مدل‌سازی عددی در کنار روش تجربی انتخاب مناسبی جهت بررسی خواص خستگی و رشد ترک خستگی در اتصالات جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی می‌باشد؛ بنابراین در این مقاله رشد ترک خستگی در نمونه‌های CT جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی، با استفاده از روش تست استاندارد ASTM E647 [29] مورد بررسی قرار گرفته است؛ و با مطالعه نمودار نرخ رشد ترک برحسب تغییرات ضریب شدت تنش، در نمونه‌های جوش کاری شده متفاوت، می‌توان تاثیر سرعت جوش کاری را بر نرخ رشد ترک خستگی بررسی نمود. همچنین با شبیه‌سازی فرآیند خستگی در نمونه‌های مدل‌سازی شده (به شیوه حرارتی) [30]، رشد ترک و تاثیر سرعت ابزار جوش کاری بر آن مطالعه شده است. مقایسه نتایج تجربی و عددی تطابق مناسبی را بین آن‌ها نشان می‌دهد.

## 2- روش آزمایش

### 2-1- جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی

در این مقاله آلیاژ مورد استفاده جهت جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی، آلومینیوم 2024-T351 می‌باشد. این آلیاژ دارای قابلیت عملیات حرارتی بوده و مشخصه T3 نشان دهنده عملیات حرارتی از نوع محلول سازی شده، کار سرد شده و پیر شده به‌صورت طبیعی بوده و عدد 51 بیانگر تنش‌زدایی به‌وسیله کشش بعد از عملیات حرارتی است. همچنین این آلیاژ مقاومت مکانیکی بسیار خوبی داشته و کاربرد فراوانی در صنایع هوافضا دارد. جدول 1 ترکیبات شیمیایی این آلیاژ را که با استفاده از روش طیف‌سنجی فلورسانس پرتو ایکس (XRF) تعیین شده است، نشان می‌دهد. خواص مکانیکی آلیاژ نیز در جدول 2 آمده است. ورق‌های به‌کاررفته دارای ابعاد 120×35 mm و

دورانی و خطی ابزار و عمق نفوذ ابزار را بر مقاومت خستگی آلیاژ آلومینیوم 6082-T6 بررسی نمودند. آن‌ها دریافته‌اند که تغییر پارامترهای فرآیند تاثیر کمی بر مقاومت خستگی اتصالات جوش کاری داشته و نسبت سرعت خطی به سرعت دورانی ( $f/s$ ) مهم‌ترین پارامتر در تعیین خواص مکانیکی اتصال می‌باشد. فنگ و همکاران [19] تاثیر پارامترهای جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی را بر رفتار خستگی کم چرخه و ریزساختار آلیاژ آلومینیوم 6061-T651 مورد بررسی قرار دادند. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده می‌توان دریافت که سرعت دورانی تاثیر ناچیزی بر خواص مکانیکی و خستگی اتصال داشته اما افزایش سرعت خطی جوش کاری عمر خستگی را افزایش می‌دهد (با افزایش سرعت خطی از 20 به 600 میلی‌متر بر دقیقه دامنه تنش سیکنی افزایش یافته و دامنه کرنش پلاستیک کاهش می‌یابد). نمونه‌های جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی عمر خستگی کوتاه‌تری و سخت‌شوندگی سیکنی بالاتری نسبت به نمونه بدون جوش دارند. ما و همکاران [20] نرخ رشد ترک خستگی را در ناحیه ناگت اتصالات جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ 2198-T8 در نسبت‌های بارگذاری ( $R_{Ratio}$ ) متفاوت مورد بررسی قرار دادند؛ با توجه به نتایج به‌دست آمده، می‌توان دریافت که برخلاف فلز پایه رشد ترک خستگی در نمونه‌های جوش کاری به  $R_{Ratio}$  حساسیت کمی دارد. موریرا و همکاران [21] نتایج مشابهی را برای آلیاژ آلومینیوم 2195-T8 گزارش نمودند. داس و همکاران [22] رفتار خستگی پرچرخه را در اتصالات جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم 6061 مورد بررسی نموده و دریافته‌اند مقاومت اتصال در حالت بارگذاری خستگی تقریباً 40% حالت بارگذاری استاتیکی است؛ همچنین افزایش سرعت دورانی جوش کاری باعث کاهش عمر خستگی می‌شود. شکست نمونه‌ها در سرعت‌های دورانی پایین در مرز بین ناحیه متاثر حرارتی مکانیکی و ناحیه حرارتی رخ می‌دهد. نتایج آزمایش‌ها خستگی آن‌ها نیز عدم حساسیت به نسبت بارگذاری را نشان می‌دهد. سیلاپاسا و همکاران [23] خواص خستگی اتصالات جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم 6No1 در ناحیه فلز پایه، ناحیه متاثر حرارتی و ناحیه ناگت مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافته‌اند که مقاومت خستگی اتصالات جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی کمتر از فلز پایه است و شکست خستگی در این اتصالات در ناحیه‌ای با کمترین سختی یعنی ناحیه متاثر حرارتی رخ می‌دهد؛ همچنین مقاومت خستگی ناحیه ناگت با وجود کمتر بودن سختی این ناحیه، نسبت به فلز پایه بیشتر است. این موضوع با توجه به ساختار ریز و یکنواخت دانه‌ها در ناحیه ناگت و همچنین سخت‌شوندگی سیکنی بیشتر این ناحیه در حین بارگذاری خستگی قابل توجه است.

علاوه بر روش‌های تجربی، مدل‌های عددی نیز به‌طور گسترده جهت شبیه‌سازی فرآیند جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی [24] و تعیین خواص شکست و خستگی نمونه‌های جوش کاری شده، کاربرد دارند. کوالیر و همکاران [25] با استفاده از روش تحلیل تنش ترموالاستیک و همچنین استفاده از دوربین CCD رشد ترک را در اتصالات آلیاژ آلومینیوم 6082 مورد بررسی قرار داده و همچنین با استفاده از یک مدل عددی رشد ترک را در این اتصالات شبیه‌سازی نمودند؛ نتایج به‌دست آمده تطابق مناسبی با مقادیر تجربی داشت. رشد ترک خستگی در اتصالات جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم 2024-T351 با استفاده از روش عددی توسط گلستانه و همکاران [26] مورد بررسی قرار گرفته است، آن‌ها ضریب شدت تنش را از روش جابه‌جایی ترک محاسبه کرده و رشد ترک خستگی را در حالت مکانیک شکست الاستیک خطی با استفاده از رابطه پاریس مورد بررسی قرار دادند. همچنین آن‌ها تحلیل‌های عددی جهت مدل‌سازی

<sup>1</sup> Franc 2D

<sup>2</sup> Dual Boundary Element

جوش کاری، ماشین کاری شده است تا ناهمواری‌ها حذف شده و پشت و روی نمونه، سطوح موازی یکدیگر داشته باشند. ضخامت نهایی نمونه‌ها پس از ماشین کاری 6 mm می‌شود. یک شیار چورون<sup>6</sup> نیز در وسط نمونه با استفاده از فرآیند اسپارک، ایجاد شده است. این شیار در وسط ناحیه ناگت جوش قرار می‌گیرد و طول شیار که از وسط سوراخ‌های نمونه اندازه‌گیری می‌شود، 17 mm می‌باشد. "شکل 2 ب" نمونه CT آماده شده نهایی را نشان می‌دهد.

آماده‌سازی و تست نمونه‌ها جهت محاسبه نرخ رشد ترک خستگی براساس استاندارد ASTM E647 [29] انجام شده است. جهت ایجاد پیش‌ترک، نمونه‌ها تحت بارگذاری خستگی با بار بیشینه 3 kN و کمینه 0.3 kN ( $R_{ratio}=0.1$ ) و فرکانس 10 Hz قرار گرفته‌اند. طول پیش‌ترک نهایی در نمونه‌های آماده‌سازی شده جهت بررسی نرخ رشد ترک خستگی 2 mm (طول ترک نهایی 19 mm و  $a/w = 0.38$ ) می‌باشد.

تست‌های خستگی در حالت دامنه بار ثابت انجام شده‌اند که در آن بار بیشینه 2.2 kN و کمینه بار 0.2 kN ( $R_{ratio}=0.1$ ) و فرکانس بارگذاری 10 Hz می‌باشد. طول ترک در سیکل‌های متفاوت بارگذاری با روش نرمی الاستیک<sup>7</sup> و با استفاده از اکستنسومتر نصب شده بر روی نمونه، اندازه‌گیری شده و جهت اطمینان از یک دوربین و یک میکروسکوپ کوچک دستی با بزرگنمایی 60 برابر نیز جهت تشخیص دقیق طول ترک استفاده شده است. تست‌های خستگی تا طول ترک نهایی 47 mm و یا تا انتهای جدایش کامل قطعه انجام می‌شود.

**جدول 1** درصد عناصر تشکیل دهنده آلیاژ آلومینیوم 2024-T351 تعیین شده با روش XRF

**Table 1** Elemental chemical composition (%) of 2024-T351 aluminum alloy

Al	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Zn
Base	4.45	0.29	1.53	0.72	0.11	0.12

**جدول 2** خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم 2024-T351

**Table 2** Mechanical properties of 2024-T351 aluminum alloy

324	(MPa)	تنش کششی تسلیم
429	(MPa)	تنش کششی نهایی
137		سختی ویکرز
0.31		ضریب پواسون
77.5	(GPa)	مدول الاستیسیته

**جدول 3** سرعت‌های دورانی و پیشروی متفاوت ابزار در نمونه‌های جوش کاری

**Table 3** Different values of applied rotational and traverse speeds of FSW experiments

نمونه	سرعت دورانی (rpm)	سرعت خطی ( $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ )
1	400	8
2	400	16
3	400	25
4	630	8
5	630	16
6	630	25
7	800	8
8	800	16
9	800	25

<sup>6</sup> Chevron Notch

<sup>7</sup> Elastic Compliance

ضخامت 8mm بوده و به‌صورت لب‌به‌لب در امتداد لبه‌ی طولی جهت جوش کاری کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند.

برای جوش کاری ورق‌ها از یک ابزار با پین مخروطی استفاده شده است. ابزار از جنس آلیاژ فولاد SPK2436 و با سختی 50 راکول<sup>1</sup> (HRC) بوده، قطر شانه ابزار 22، قطر ابتدای پین 8، قطر انتهای پین 6 و ارتفاع پین 7.6 میلی‌متر می‌باشد و رزوه‌هایی با گام 1 mm روی آن ایجاد شده است. پین مخروطی باعث سهولت نفوذ ابزار در قطعه‌کار شده و به اندازه زیادی از نیروی عمودی مورد نیاز جهت جوش کاری می‌کاهد، همچنین رزوه‌های ایجاد شده موجب می‌شود که در هر دور چرخش ابزار، حجم بیشتری از ماده نرم‌شده جابه‌جا گردد.

جوش کاری با یک دستگاه فرز یونیورسال MP4، 2 تن، انجام شده است. ابتدا دو ورق آلومینیومی در امتداد لبه طولی در کنار یکدیگر قرار گرفته و سپس در داخل گیره‌ها مقید می‌شوند. همچنین از یک ورق فولادی به عنوان صفحه نگه‌دارنده زیرین استفاده شده است. زاویه کجی<sup>2</sup> ابزار 2 درجه در نظر گرفته شده است. جوش کاری ورق‌ها با سرعت‌های دورانی و پیشروی مختلف ابزار انجام شده که مقادیر این سرعت‌ها در جدول 3 آمده است. با توجه به جنس و ضخامت نمونه‌ها، برای سرعت‌های دورانی کمتر از 400 rpm به دلیل عدم ایجاد حرارت کافی، نمونه‌های جوش کاری شده مناسبی به دست نمی‌آید، همچنین در سرعت‌های دورانی بالاتر از 800 rpm سطح نمونه‌های جوش کاری شده به دلیل سرعت بالای ابزار معمولاً ناهموار و به‌صورت پوسته‌ای است. با توجه به قابلیت دستگاه فرز، با انتخاب چندین سرعت دورانی (400، 630 و 800 دور بر دقیقه) و با انجام جوش کاری‌های متعدد، سرعت‌های پیشروی ابزار (8، 16 و 25 میلی‌متر بر دقیقه) به‌گونه‌ای انتخاب شده‌اند تا نمونه‌های جوش کاری شده مناسب و با کمترین عیوب به دست آید. علاوه بر سرعت پیشروی و دورانی، سایر پارامترهای جوش کاری، مانند عمق نفوذ ابزار (0.3 mm) و شکل پین، پس از انجام جوش‌های متفاوت به‌گونه‌ای انتخاب شده‌اند تا حرارت و در نتیجه ناحیه خمیری مناسبی در حین فرآیند ایجاد شده و حفره و ترک در مقطع ناحیه جوش به وجود نیاید. علاوه بر بازرسی چشمی ناحیه جوش کاری، با استفاده از تست پرتونوگرافی اشعه ایکس نیز نمونه‌ها جهت اطمینان از عدم وجود عیوب مورد بررسی قرار گرفته‌اند. اندازه‌گیری، تحلیل و بررسی ریزساختار، سختی و تنش پسماند برای نمونه‌های اشاره شده، توسط نویسندگان در تحقیقات گذشته [30] انجام شده است.

## 2-2- تعیین نرخ رشد ترک خستگی

آزمایش‌های خستگی بر روی نمونه‌های بدون جوش و جوش کاری شده با استفاده از دستگاه تست کشش ژوئیک<sup>3</sup> 10<sup>3</sup> تن انجام شده است. همان‌طور که در "شکل 1" دیده می‌شود، برای تعیین دقیق طول ترک علاوه بر اکستنسومتر<sup>4</sup> از یک دوربین نیز در مقابل نمونه تحت بار که ترک در آن رشد می‌کند، استفاده شده است. آزمایش‌ها بر روی نمونه CT که در "شکل 2" نشان داده شده، انجام شده است. جهت آماده‌سازی نمونه‌ها ورق‌هایی با ابعاد اشاره شده در بخش 1-2 در جهت نورد ورق (جهت L-T) جدا شده، قطعات به یکدیگر جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی شده‌اند، سپس با استفاده از ماشین کاری نمونه‌های CT به‌دست‌آمده‌اند. سطح بالای<sup>5</sup> نمونه‌های

<sup>1</sup> Rockwell

<sup>2</sup> Tilt angle

<sup>3</sup> Zwick

<sup>4</sup> Extensometer

<sup>5</sup> Crown Side

روش چندجمله‌ای افزاینده<sup>1</sup> رسم شده است. به کمک این منحنی و استفاده از استاندارد ASTM E647 [29] می‌توان نمودار نرخ رشد ترک خستگی ( $da/dN$ ) برحسب نرخ تغییرات ضریب شدت تنش ( $\Delta K$ ) را برای نمونه‌های مورد آزمایش رسم نمود. جهت کاهش پراکندگی ذاتی<sup>2</sup> در داده‌های به‌دست‌آمده، منحنی‌های رشد ترک به صورت میانگین سه آزمایش انجام شده، رسم شده‌اند. بدین صورت که بازای تغییرات ضریب شدت تنش مشابه، میانگین نرخ رشد ترک خستگی مربوط به سه آزمایش محاسبه می‌شود.

### 3- شبیه‌سازی اجزا محدود

مدل‌سازی عددی فرآیند جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی در نرم‌افزار آباکوس<sup>3</sup>، به روش حرارتی توسط نویسندگان در مرجع [30] انجام گرفته است. پس از مدل‌سازی فرآیند، نمونه‌ها با استفاده از تکنیک تغییر مدل، به فرم نمونه CT درآمده‌اند. ابعاد نمونه  $62.5 \times 60$  mm و ضخامت آن 6 mm بوده و شکافی به طول 17 mm در وسط آن قرار دارد که در انتهای آن ترکی با طول 2 mm مدل شده است ( $a/w = 0.38$ ). شکل 3 نمونه CT مدل-سازی شده را پس از تغییر مدل نشان می‌دهد. در مرحله بعدی، رشد ترک خستگی بر روی این نمونه شبیه‌سازی شده است. در شبیه‌سازی خستگی محل سوراخ‌ها تحت بارگذاری کششی تناوبی 0.2 kN و 2.2 kN ( $R_{ratio} = 0.1$ ) قرار گرفته است.

در این تحلیل جهت بررسی آسیب در نمونه، از معیار آسیب تنش بیشینه<sup>4</sup> استفاده شده است. معیار شکست در این روش بیشترین تنش اصلی در المان است که در این بررسی مقدار تنش 320 MPa [31] آغاز شکست در ماده فرض شده است. پس از رسیدن تنش به حد نهایی تا قبل از شکست کامل، مقداری انرژی توسط ماده جذب می‌شود. این انرژی همان سطح زیر نمودار تنش-کرنش پس از حد استحکام ماده است که مقدار آن 2870 ژول تعریف شده است [31].

با توجه به این که تحلیل از نوع بارگذاری نوسانی و آسیب دیدگی ماده بر اثر پدیده خستگی می‌باشد، تحلیلی تحت عنوان چرخه مستقیم<sup>5</sup> تعریف می‌شود. در تحلیل چرخه مستقیم باید طول بازه زمانی هر سیکل بارگذاری مشخص باشد که در این تحلیل طول هر سیکل بارگذاری 0.1 در نظر گرفته شده است (فرکانس بارگذاری 10 Hz است). در گام تحلیل چرخه مستقیم نوع تحلیل در حالت خستگی کم چرخه<sup>6</sup> قرار داده می‌شود. شیوه تحلیل به این شکل است که پاسخ قطعه نسبت به بارگذاری در یک سیکل مشخص می‌شود و از روی آن و با توجه به خواص ماده رفتار ماده در چند سیکل جلوتر پیش‌بینی می‌شود و باید یک حداقل و حداکثر برای آن تعیین شود. در این تحلیل مقادیر 20 و 200 برای حداقل و حداکثر در نظر گرفته شده است. همچنین باید بیشترین تعداد سیکلی که توسط نرم‌افزار بررسی می‌شود را مشخص نمود. با توجه به آزمایش‌ها تجربی انجام گرفته مقدار بیشترین سیکل در نرم‌افزار 150 هزار سیکل تعریف شده است.

ترکی به طول 2 mm که متناسب با طول پیش‌ترک در آزمایش‌ها تجربی می‌باشد، در انتهای شیار نمونه CT تعریف می‌شود. نوع تعریف ترک نیز XFEM در نظر گرفته شده که این روش قابلیت گسترش ترک را فراهم می‌کند. برای المان‌بندی در ناحیه گسترش ترک نیز از المان‌های C3D8 به

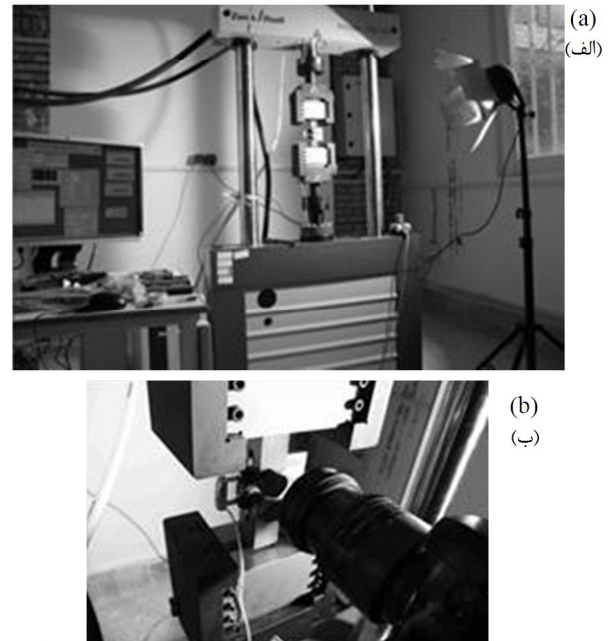


Fig. 1 The tensile test apparatus (a), clamped specimen with extensometer and a camera (b)

شکل 1 الف: دستگاه آزمایش خستگی، ب: نمونه بسته شده در گیره همراه با اکستنسومتر و دوربین جهت تعیین طول ترک

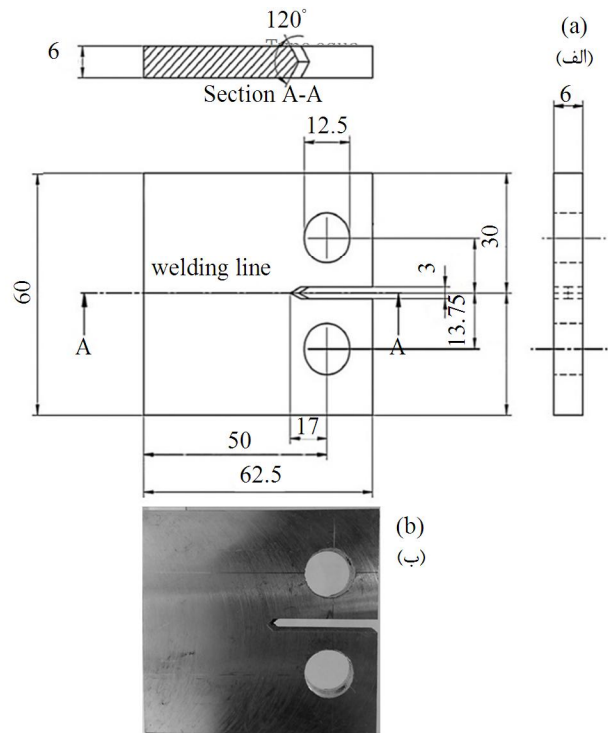


Fig. 2 Dimensions of the compact tension (CT) specimen (a), prepared CT specimen (b)

شکل 2 الف: تصویر شماتیک نمونه CT همراه با ابعاد آن، ب: نمونه CT آماده‌سازی شده

10 نمونه متفاوت جهت آزمایش رشد ترک خستگی استفاده شده است که شامل 9 نمونه جوش کاری با شرایط متفاوت و یک نمونه فلز پایه می‌باشد. جهت کاهش خطا و افزایش اطمینان، آزمایش بر روی هر نوع از نمونه‌ها، 3 بار تکرار شده است. نمودار طول ترک برحسب سیکل‌های بارگذاری براساس

<sup>1</sup> Incremental Polynomial Method

<sup>2</sup> Intrinsic Scatter

<sup>3</sup> ABAQUS

<sup>4</sup> Maxps Damage

<sup>5</sup> Direct Cyclic

<sup>6</sup> Low Cycle Fatigue Analysis



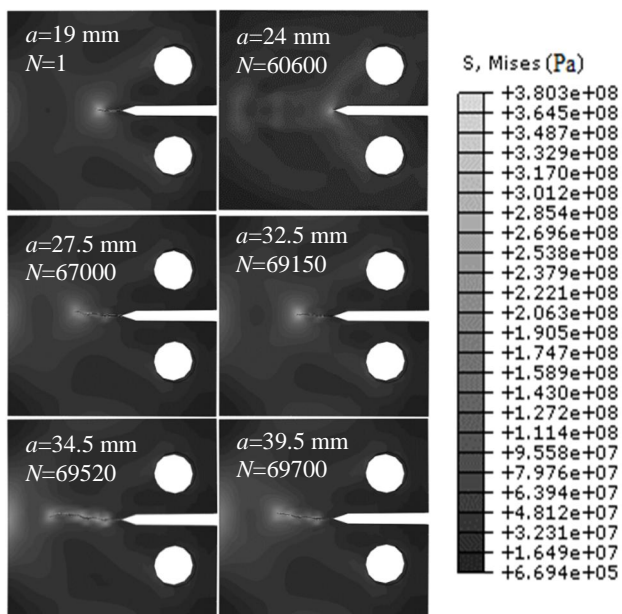


Fig. 4 crack propagation in FE model for different cycles and crack length for specimen 1

شکل 4 رشد تدریجی ترک خستگی در نمونه جوش کاری 1 اجزا محدود در طول ترک ( $a$ ) و سیکل بارگذاری متفاوت ( $N$ )

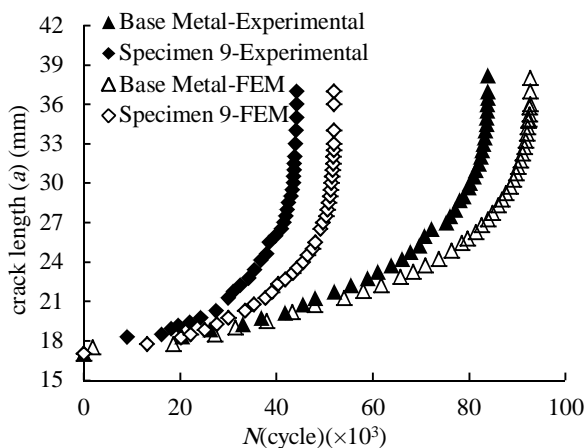


Fig. 5 Experimental and FEM results for crack length vs. cycles

شکل 5 نتایج تجربی و شبیه‌سازی طول ترک برحسب تعداد سیکل

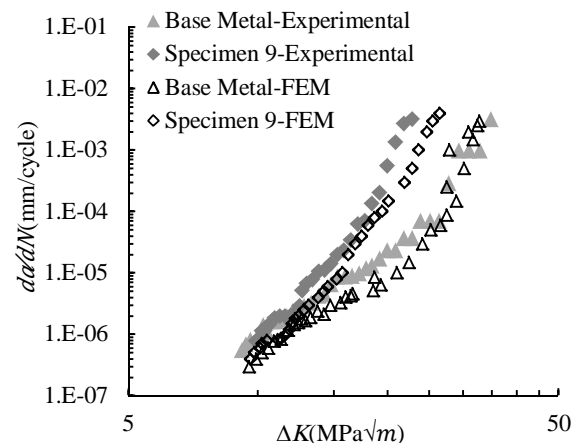


Fig. 6 Fatigue crack growth vs. stress intensity factor diagram

شکل 6 نمودار نرخ رشد ترک برحسب تغییرات ضریب شدت تنش

ابعاد 0.2 mm استفاده شده است.

جهت شبیه‌سازی خستگی و گسترش ترک در نمونه، ویژگی‌های مکانیکی ماده و رفتار آن در مقابل بارگذاری سیکلی، در محیط کلیدواژه<sup>1</sup> نرم‌افزار تعریف می‌شود. اساس بررسی پدیده خستگی در نرم‌افزار آباکوس بر مبنای قانون پاریس که در رابطه (1) نشان داده شده است، می‌باشد [32].

$$\frac{da}{dN} = c_3 \Delta G c_4 \quad (1)$$

که در آن  $a$  طول ترک،  $N$  تعداد سیکل بارگذاری،  $\Delta G$  تغییرات نرخ انرژی شکست آزاد شده و  $c_3$  و  $c_4$  ثابت‌هایی از ماده هستند. همچنین تابع شکست در ماده با در نظر داشتن پدیده خستگی، به صورت رابطه (2) تعریف می‌شود.

$$f = \frac{N}{c_1 \Delta G c_2} \geq 1.0 \quad (2)$$

که در آن  $N$  تعداد سیکل بارگذاری و  $c_1$  و  $c_2$  ضرایب مربوط به خواص ماده می‌باشد. شرط آغاز رشد ترک آن است که تابع  $f$  به مقداری بزرگ‌تر از 1 برسد. جهت مدل‌سازی خستگی و تعریف خواص خستگی باید در قسمت کلیدواژه‌های نرم‌افزار ثابت‌های اشاره شده را که از آزمایش‌های تجربی به دست آمده است، وارد نموده و در نهایت تحلیل و پردازش مسئله انجام می‌شود. "شکل 4" بازشدگی تدریجی و رشد ترک را متناسب با افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری، در نمونه CT جوش کاری شده نشان می‌دهد. با توجه به روند رشد ترک و سیکلی که رشد ترک در آن نمایش داده شده است، می‌توان مقادیر را ثبت و نمودار طول ترک برحسب سیکل بارگذاری را برای نمونه مورد نظر ترسیم کرد.

#### 4- تحلیل نتایج

تست‌های خستگی بر روی نمونه‌ها براساس استاندارد ASTM E647 انجام شده است. تغییرات ضریب شدت تنش ( $\Delta K$ ) در آزمایش‌ها حدود 8 تا 38  $MPa\sqrt{m}$  و همچنین نرخ رشد ترک ( $da/dN$ )،  $4 \times 10^{-3}$  تا  $4 \times 10^{-7}$  mm/cycle می‌باشد. علاوه بر آن بررسی عددی رشد ترک خستگی نیز براساس آنچه توضیح داده شد، انجام شده است. "شکل 5" نتایج تجربی و عددی طول ترک برحسب سیکل بارگذاری ( $a-N$ ) را برای نمونه جوش کاری 9 و نمونه فلز پایه نشان می‌دهد. همچنین نمودار نرخ رشد ترک خستگی برحسب تغییرات ضریب شدت تنش نیز در "شکل 6" آمده است.

با توجه به "شکل‌های 5 و 6" می‌توان دریافت که اختلاف نتایج تجربی و عددی حدود 17% است. دلیل این اختلاف شبیه‌سازی حرارتی نمونه‌های جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی اولیه و در نظر نگرفتن رفتار ترمومکانیکی،

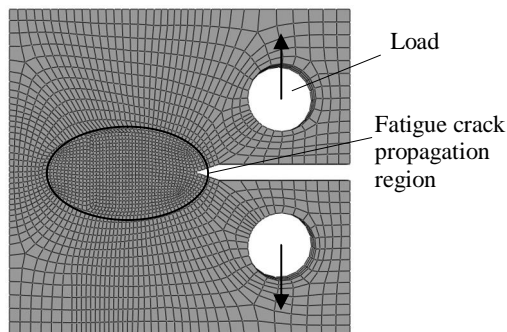


Fig. 3 FE model of meshed CT specimen

شکل 3 مدل اجزا محدود نمونه CT

<sup>1</sup> Keywords

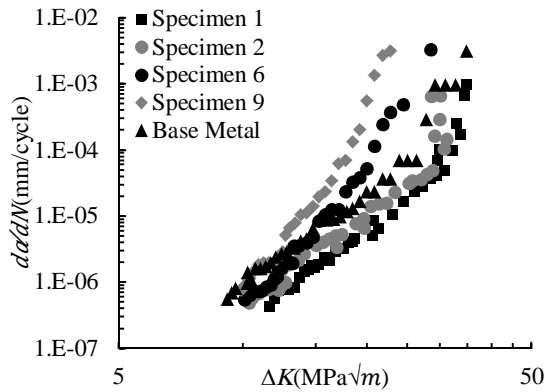


Fig. 7 Experimental fatigue crack growth vs. stress intensity factor range of base metal and some welded specimens

شکل 7 منحنی نرخ رشد ترک بر حسب تغییرات ضریب شدت تنش در فلز پایه و تعدادی از نمونه‌های جوش کاری

جدول 4 مقادیر  $m$  و  $c$  رابطه پاریس برای فلز پایه و نمونه‌های جوش کاری

Table 4 Paris constants calculated for base metal and welded specimens

تجربی		نمونه	تجربی		نمو
$m$	$c$		$m$	$c$	
3.92	$1.18 \times 10^{-8}$	6	3.45	$2.46 \times 10^{-8}$	1
5.34	$2.90 \times 10^{-10}$	7	4.03	$2.58 \times 10^{-9}$	2
5.11	$1.23 \times 10^{-9}$	8	6.37	$3.9 \times 10^{-11}$	3
4.27	$8.18 \times 10^{-9}$	9	5.27	$1.01 \times 10^{-9}$	4
3.97	$9.97 \times 10^{-9}$	فلز پایه	3.64	$3.01 \times 10^{-8}$	5

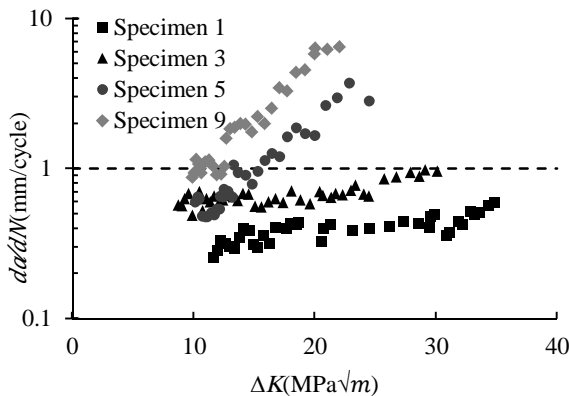


Fig. 8 Normalized fatigue crack growth rate vs. stress intensity range

شکل 8 منحنی نرخ رشد ترک نرمال شده بر حسب تغییرات ضریب شدت تنش

می‌توان نتیجه گرفت که کاهش سرعت خطی جوش کاری می‌تواند باعث بهتر شدن رفتار خستگی شود. با افزایش سرعت دورانی از 400 rpm به 800 rpm رفتار خستگی نمونه‌ها تغییر خواهد کرد، بدین‌صورت که نمونه‌ها در سرعت‌های خطی پایین‌تر رفتار بهتری داشته، اما نرخ رشد ترک در سرعت‌های خطی بالاتر بسیار افزایش خواهد یافت (به‌ویژه برای مقادیر بالای  $\Delta K$ ). با افزایش سرعت خطی جوش کاری حرارت کافی جهت خمیری شدن و جریان مواد در ناحیه اغتشاش تولید نشده و امکان عیوب ریزساختاری و ترک‌های طولی در ناحیه جوش کاری افزایش می‌یابد [33] که این مورد باعث افزایش بیشتر نرخ رشد ترک در ناحیه ناگت خواهد شد.

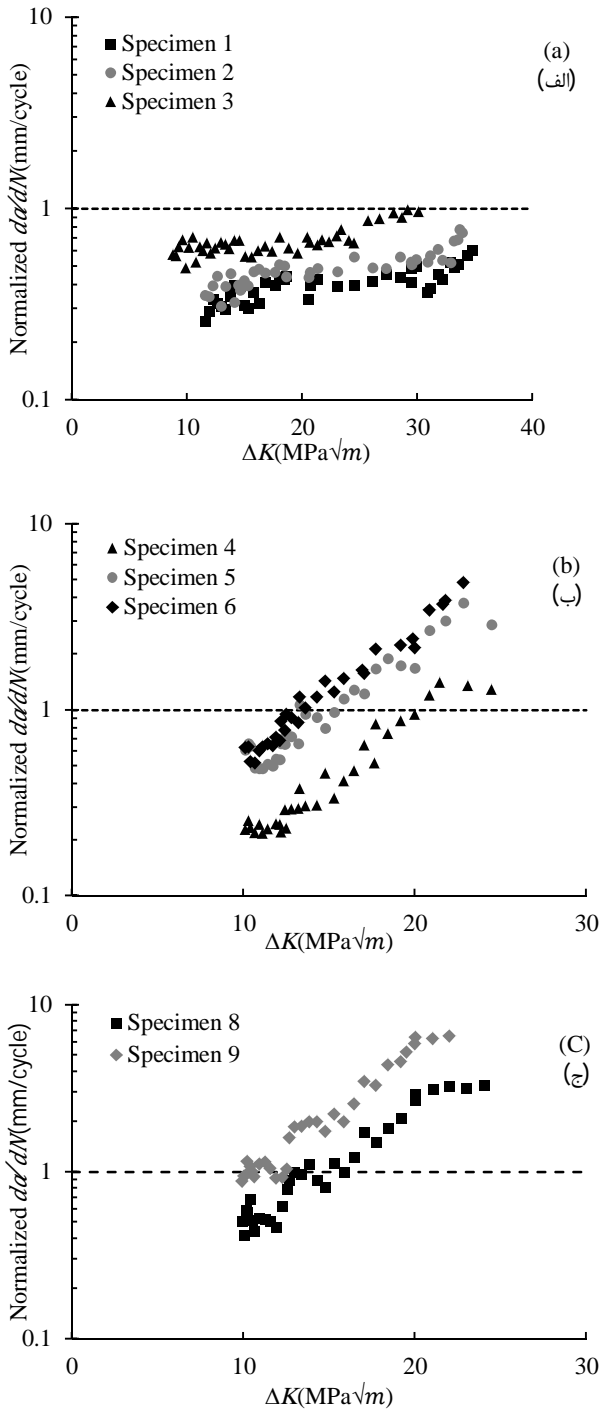
با توجه به شکل 10 که تغییرات منحنی خستگی را به ازای افزایش سرعت دورانی از 400 rpm به 800 rpm در سرعت خطی ثابت

جریان مواد و تغییرات ریزساختار می‌باشد؛ همچنین عیوب ریزساختاری از عوامل تاثیرگذار بر افزایش رشد ترک خستگی در نمونه‌های تجربی می‌باشد که تاثیر این عیوب در شبیه‌سازی نمونه‌های جوش کاری اولیه در نظر گرفته نشده است، این عامل باعث می‌شود در تمامی نمونه‌های شبیه‌سازی عددی تعداد سیکل‌های خستگی همواره نسبت به نمونه‌های تجربی مشابه بیشتر باشد. از دیگر عوامل اختلاف نتایج، عدم تطابق کامل نمونه تجربی و عددی و خطاهای روش تجربی است؛ بنابراین مدل عددی می‌تواند پیش‌بینی مناسبی از رشد ترک خستگی در نمونه‌های جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی ارائه دهد.

"شکل 7" نمودار نرخ رشد ترک خستگی را برای 4 نمونه جوش کاری شده متفاوت نشان می‌دهد. جدول 4 مقادیر  $c$  و  $m$  رابطه پاریس را که از نتایج تجربی به‌دست‌آمده‌اند را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج می‌توان دریافت که شرایط جوش کاری بر منحنی‌های خستگی تاثیرگذار می‌باشد. در مقادیر پایین  $\Delta K$  (در منحنی خستگی)، نرخ رشد ترک در تمامی نمونه‌های جوش کاری پایین‌تر و یا برابر با فلز پایه (نمونه بدون جوش) است. در سرعت‌های خطی و دورانی بالا، منحنی خستگی نمونه‌های جوش کاری به ازای مقادیر کم  $\Delta K$ ، پایین‌تر از نمونه فلز پایه قرار می‌گیرد، اما نرخ رشد ترک به تدریج به ازای مقادیر زیاد  $\Delta K$ ، افزایش یافته و در برخی از نمونه‌ها در سطحی بالاتر از فلز پایه قرار می‌گیرد. برای نمونه جوش کاری شده با سرعت 400 rpm و سرعت خطی 8 mm/min، منحنی خستگی هیچ‌گاه بالاتر از فلز پایه قرار نمی‌گیرد؛ به‌طورکلی در سرعت‌های جوش کاری پایین به ازای تمام مقادیر  $\Delta K$ ، نرخ رشد ترک پایین‌تر از فلز پایه می‌باشد (برای مثال سرعت دورانی 400 rpm و سرعت‌های خطی 8 mm/min، 16 mm/min و 25 mm/min). این رفتار در "شکل 8" به‌صورت واضح‌تر نشان داده شده است. این شکل نرخ رشد نرمال شده را که از تقسیم نرخ رشد ترک در نمونه جوشکاری مورد نظر  $(da/dN)_w$  به نرخ رشد ترک در فلز پایه  $(da/dN)_b$  به دست می‌آید، نشان می‌دهد. تاثیر سرعت دورانی و خطی جوش کاری بر رفتار خستگی نمونه‌ها را بدین‌صورت می‌توان خلاصه نمود که سرعت جوش کاری بالاتر منجر به نرخ رشد بالاتر خواهد شد.

نرخ رشد ترک در نمونه جوش کاری با سرعت پایین (400 rpm و 8 mm/min) به ازای مقادیر پایین  $\Delta K$  ( $\Delta K = 11 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ) تقریباً 4 برابر کمتر از نمونه فلز پایه بوده و با افزایش  $\Delta K$  به ازای مقادیر بالای آن ( $\Delta K = 34 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ )، نرخ رشد ترک تا 60% نرخ رشد در فلز پایه افزایش می‌یابد. برای سرعت دورانی 630 rpm و سرعت خطی 16 mm/min نرخ رشد نرمال شده از نصف نرخ رشد نسبت به فلز پایه آغاز شده و به ازای مقدار تقریبی  $\Delta K = 15 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  به مقادیر بالاتر از فلز پایه می‌رسد. در سرعت‌های خطی و دورانی بالا (800 rpm و 25 mm/min) به ازای مقدار تقریبی  $\Delta K = 22 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ، نرخ رشد ترک تقریباً 5 برابر نسبت به فلز پایه بالاتر است.

"شکل 9" تاثیر سرعت خطی جوش کاری را بر رفتار خستگی نمونه‌های جوش کاری نشان می‌دهد؛ در سرعت‌های دورانی پایین (400 rpm)، با افزایش سرعت خطی نرخ رشد ترک افزایش می‌یابد اما همچنان پایین‌تر از فلز پایه است؛ به عبارت دیگر در سرعت‌های دورانی پایین نمونه‌های جوشکاری رفتار خستگی بهتری نشان می‌دهند. برای سرعت‌های دورانی بالاتر نرخ رشد ترک در نمونه‌های جوش کاری، بالاتر از فلز پایه بوده و با افزایش سرعت خطی جوش کاری نیز نرخ رشد ترک افزایش می‌یابد؛ بنابراین



**Fig. 9** Effect of traverse speed on normalized crack growth rate at different rotational speeds. 400 rpm (a), 630 rpm (b) and 800 rpm (c)

شکل 9 منحنی نرخ رشد ترک نرمال شده برای سرعت‌های خطی متفاوت

جوش کاری در سرعت دورانی، الف: 400 rpm، ب: 630 rpm، ج: 800 rpm

سرعت‌های خطی و دورانی بر رفتار خستگی اتصالات جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی پیچیده است؛ اما به‌طور کلی می‌توان گفت، برای مقادیر کم  $\Delta K$ ، تنش‌های پسماند نرخ رشد ترک را کاهش داده و در مقادیر بالای  $\Delta K$  عیوب متالورژیکی (مانند عیوب تونلی) نرخ رشد ترک را افزایش می‌دهند.

### 5- نتیجه گیری

در این مقاله فرآیند جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی با سرعت‌های متفاوت بر

16 mm/min نشان می‌دهد، می‌توان دریافت که با افزایش سرعت دورانی نرخ رشد ترک افزایش می‌یابد. سرعت‌های دورانی بالاتر در نمونه‌های جوش کاری باعث اغتشاش نامناسب جریان مواد در ناحیه جوش کاری شده و احتمال ایجاد عیوب تونلی در ناحیه ناگت را افزایش می‌دهد [34]؛ بنابراین در سرعت‌های دورانی بالاتر نرخ رشد ترک افزایش می‌یابد.

اگرچه در تمام موارد و نیازمندی‌های موجود در استانداردهای ASTM E647 جهت انجام آزمایش‌ها خستگی رعایت شده است، اما ترک خستگی در حین آزمایش نمونه‌های جوش کاری شده تمایل به دور شدن از خط مرکزی دارد (برخلاف نمونه فلز پایه)؛ این پدیده در نتیجه اختلاف خواص مکانیکی ناحیه ناگت و ناحیه متأثر حرارتی می‌باشد. همچنین توزیع تنش پسماند نیز در نواحی مختلف جوش کاری متفاوت می‌باشد که این عامل نیز بر انحراف ترک از خط مرکزی تاثیرگذار است.

سرعت جوش کاری بر رفتار خستگی و مسیر ترجیحی رشد ترک تاثیرگذار خواهد بود که این در نتیجه اختلاف در ریزساختار و ابعاد ناحیه تضعیف شده<sup>1</sup> در اطراف ناحیه ناگت می‌باشد. در برخی از نمونه‌ها، رشد ترک در دو سمت نمونه با یکدیگر متفاوت می‌باشد؛ در قسمت روی نمونه (سمت ابزار) انحراف ترک از خط مرکزی به دلیل تغییر شکل‌های پلاستیک بالاتر، بیشتر می‌باشد.

در ناحیه رشد ترک خستگی سطح شکست نمونه‌های جوشکاری به ازای مقادیر پایین  $\Delta K$ ، شامل تعداد زیادی سطوح بین دانه‌ای<sup>2</sup> می‌باشد [36,35]. این سطوح بین دانه‌ای همان‌طور که در منحنی‌های خستگی مشاهده می‌شود (در مقادیر پایین  $\Delta K$ ) باعث کاهش نرخ رشد ترک خواهند شد. این کاهش در نتیجه ایجاد پیچ و خم در مسیر رشد ترک و انحراف ترک از صفحه تنش بیشینه توسط سطوح بین دانه‌ای ایجاد شده در ناحیه ناگت نمونه‌های جوش کاری می‌باشد.

براساس تصاویر میکروسکوپی سطوح شکست نمونه‌های CT بعد از تست خستگی که نمونه آن در "شکل 11" نشان داده شده است، 3 ناحیه را می‌توان در سطح شکست تشخیص داد: ناحیه پیش‌ترک خستگی، ناحیه رشد ترک و ناحیه شکست نهایی. در ناحیه پیش‌ترک خستگی، جوانه‌زنی و رشد ترک<sup>3</sup> به علت برخی عیوب ریزساختاری رخ می‌دهد. علاوه بر این عیوب، در ناحیه رشد ترک خستگی نیز عیوب تونلی دیده می‌شوند، اما این عیوب در نمونه‌های با خواص خستگی مناسب، دیده نمی‌شوند. عیوب تونلی می‌توانند به عنوان یک شکاف عمل کرده و ضریب شدت تنش محلی و نرخ رشد ترک را به ازای مقادیر بالای  $\Delta K$  افزایش دهند؛ در این مقادیر  $\Delta K$  تاثیر تنش‌های پسماند فشاری درونی ایجاد شده توسط جوش کاری قابل صرف‌نظر کردن است. ولی تنش‌های پسماند به ازای مقادیر پایین  $\Delta K$ ، بر رشد ترک تاثیرگذار خواهند بود؛ بنابراین نرخ رشد ترک در نمونه‌های جوش کاری نسبت به فلز پایه کاهش می‌یابد.

برخی تحقیقات نیز نشان می‌دهند تنش‌های پسماند فشاری در ناحیه جوش کاری، ضرایب شدت تنش در نوک ترک را کاهش می‌دهند [37]، همچنین نرخ رشد در مقادیر پایین  $\Delta K$  کاهش می‌یابد؛ و با افزایش مقادیر  $\Delta K$  تاثیر مثبت تنش‌های پسماند فشاری بر رشد ترک کاهش می‌یابد، به طوری که در مقادیر بالای  $\Delta K$  نرخ رشد ترک در نمونه‌های جوش کاری بالاتر از فلز پایه قرار می‌گیرد [38]. با توجه به این توضیحات، تاثیر

<sup>1</sup> Weakened Zone

<sup>2</sup> Intergranular Facets

<sup>3</sup> Crack Initiation



سرعت‌های خطی و دورانی پایین‌تر را برای رسیدن به خواص خستگی بهتر در اتصالات جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی نشان می‌دهند.

### 6- مراجع

- [1] W. Thomas, Friction stir butt welding, *International Patent Application No. PCT/GB92/0220*, 1991.
- [2] M. Peel, A. Steuwer, M. Preuss, P. Withers, Microstructure, mechanical properties and residual stresses as a function of welding speed in aluminium AA5083 friction stir welds, *Acta Materialia*, Vol. 51, No. 16, pp. 4791-4801, 2003.
- [3] M. Elyasi, H. A. Derazkola, M. Hosseinzadeh, Effects of friction stir welding parameters on mechanical quality of AA1100 aluminum alloy to A441 AISI steel joint, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 4, pp. 379-390, 2015. (in persian فارسی)
- [4] R. Nandan, T. DebRoy, H. Bhadeshia, Recent advances in friction-stir welding—process, weldment structure and properties, *Progress in Materials Science*, Vol. 53, No. 6, pp. 980-1023, 2008.
- [5] S. Lomolino, R. Tovo, J. Dos Santos, On the fatigue behaviour and design curves of friction stir butt-welded Al alloys, *International Journal of Fatigue*, Vol. 27, No. 3, pp. 305-316, 2005.
- [6] O. T. Midling, L. D. Oosterkamp, J. Bersaas, Friction stir welding aluminium—process and applications, in *Seventh international conference INALCO'98*, Cambridge, UK, pp. 175-183, 1999.
- [7] G. Bussu, P. Irving, The role of residual stress and heat affected zone properties on fatigue crack propagation in friction stir welded 2024-T351 aluminium joints, *International Journal of Fatigue*, Vol. 25, No. 1, pp. 77-88, 2003.
- [8] L. Magnusson, L. Kallman, Mechanical properties of friction stir welds in thin sheet of aluminium 2024, 6013 and 7475, in *Second International Symposium on FSW, Gothenburg, Sweden*, June 2000.
- [9] M. Kumagai, S. Tanaka, Properties of aluminum wide panels by friction stir welding, in *the First International Symposium on Friction Stir Welding*, Thousand Oaks, CA, USA, 1999.
- [10] M. James, D. Hattin, G. Bradley, Weld tool travel speed effects on fatigue life of friction stir welds in 5083 aluminium, *International Journal of Fatigue*, Vol. 25, No. 12, pp. 1389-1398, 2003.
- [11] G. Pouget, A. P. Reynolds, Residual stress and microstructure effects on fatigue crack growth in AA2050 friction stir welds, *International Journal of Fatigue*, Vol. 30, No. 3, pp. 463-472, 2008.
- [12] A. F. Golestaneh, A. Ali, M. Zadeh, Modelling the fatigue crack growth in friction stir welded joint of 2024-T351 Al alloy, *Materials & Design*, Vol. 30, No. 8, pp. 2928-2937, 2009.
- [13] K. Walker, The effect of stress ratio during crack propagation and fatigue for 2024-T3 and 7075-T6 aluminum, *Effects of Environment and Complex Load History on Fatigue Life*, Vol. 462, pp. 1-14, 1970.
- [14] D. Nicholls, The relation between crack blunting and fatigue crack growth rates, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 17, No. 4, pp. 459-467, 1994.
- [15] L. Fratini, S. Pasta, A. P. Reynolds, Fatigue crack growth in 2024-T351 friction stir welded joints: Longitudinal residual stress and microstructural effects, *International Journal of Fatigue*, Vol. 31, No. 3, pp. 495-500, 2009.
- [16] W.-K. Kim, S.-T. Won, B.-C. Goo, A study on mechanical characteristics of the friction stir welded A6005-T5 extrusion, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 11, No. 6, pp. 931-936, 2010.
- [17] P. Moreira, A. De Jesus, A. Ribeiro, P. De Castro, Fatigue crack growth in friction stir welds of 6082-T6 and 6061-T6 aluminium alloys: A comparison, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 50, No. 2, pp. 81-91, 2008.
- [18] A. Cirello, G. Buffa, L. Fratini, S. Pasta, AA6082-T6 friction stir welded joints fatigue resistance: influence of process parameters, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 220, No. 6, pp. 805-811, 2006.
- [19] A. Feng, D. Chen, Z. Ma, Microstructure and low-cycle fatigue of a friction-stir-welded 6061 aluminum alloy, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 41, No. 10, pp. 2626-2641, 2010.
- [20] Y. E. Ma, Z. Zhao, B. Liu, W. Li, Mechanical properties and fatigue crack growth rates in friction stir welded nugget of 2198-T8 Al-Li alloy joints, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 569, No. 1, pp. 41-47, 2013.
- [21] P. Moreira, A. de Jesus, M. de Figueiredo, M. Windisch, G. Sinnema, P. de Castro, Fatigue and fracture behaviour of friction stir welded aluminium-lithium 2195, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 60, No. 1, pp. 1-9, 2012.
- [22] D. Hrishikesh, D. Chakraborty, T. K. PAL, High-cycle fatigue behavior of friction stir butt welded 6061 aluminium alloy, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 24, No. 3, pp. 648-656, 2014.
- [23] K. Sillapasa, S. Surapunt, Y. Miyashita, Y. Mutoh, N. Seo, Tensile and fatigue behavior of SZ, HAZ and BM in friction stir welded joint of rolled 6N01 aluminum alloy plate, *International Journal of Fatigue*, Vol. 63, No. 1, pp. 162-170, 2014.
- [24] H. A. Derazkola, M. Habibnia, H. J. Aval, Study on frictional heat behavior and material flow during friction stir welding of AA1100 aluminum alloy,

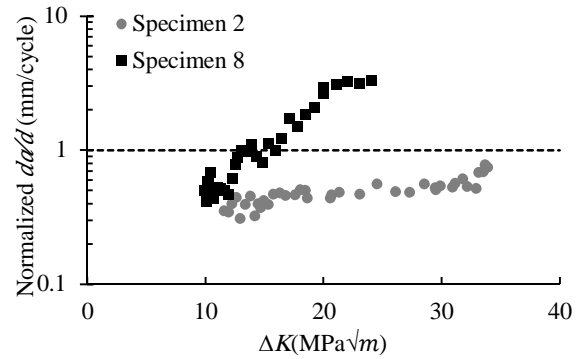


Fig. 10 Effect of rotational speed on normalized crack growth rate at traverse speed of 16 mm/min

شکل 10 منحنی نرخ رشد ترک نرمال شده برای سرعت‌های دورانی متفاوت و سرعت خطی  $16 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$

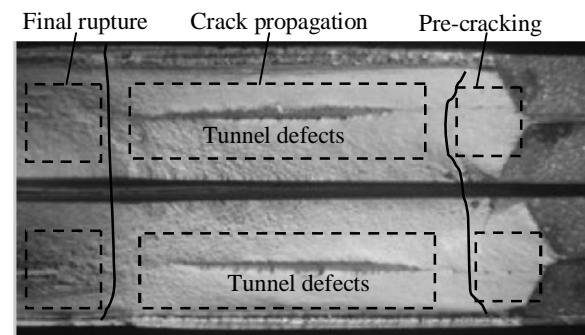


Fig. 11 The fracture surface of the specimen that welded by inappropriate welding condition

شکل 11 عیوب تونلی در ناحیه رشد ترک خستگی در نمونه جوش کاری شده با پارامترهای جوش کاری نامناسب

روی ورق‌های آلیاژ آلومینیوم 2024-T351 انجام گرفته و سپس رشد ترک خستگی و تاثیر سرعت جوش کاری بر رشد ترک در اتصالات مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایش‌های متالوگرافی، سختی و تنش پسماند نیز بر روی نمونه‌ها در تحقیقات گذشته توسط نویسندگان بررسی شده است. همچنین پس از مدل‌سازی عددی فرآیند جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی، رشد ترک خستگی نیز در اتصالات شبیه‌سازی شده و مقایسه نتایج عددی نمودارهای طول ترک برحسب سیکل بارگذاری، با نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌های تجربی تطابق مناسبی را نشان می‌دهد. تفاوت بین نتایج عددی و تجربی، به علت برخی عیوب ظاهر شده در هنگام جوش کاری اصطکاکی نمونه‌ها و همچنین تقریب‌های بکار رفته در مدل عددی می‌باشد. با بررسی نمودارهای تجربی و عددی نرخ رشد ترک برحسب تغییرات ضریب شدت تنش می‌توان دریافت به ازای مقادیر کم  $\Delta K$  نرخ رشد ترک در ناحیه ناگت همواره نسبت به نمونه‌ی فلز پایه کم‌تر بوده و با افزایش  $\Delta K$  نرخ رشد ترک افزایش می‌یابد. نرخ رشد ترک پایین در مقادیر کم  $\Delta K$  احتمالاً به دلیل تاثیر مثبت تنش‌های پسماند فشاری و نرخ رشد ترک زیاد در مقادیر بالای  $\Delta K$  نیز احتمالاً به دلیل وجود برخی عیوب ریز متالورژیکی می‌باشد. همچنین در نمونه‌های جوش کاری شده با سرعت‌های دورانی بالا، نرخ رشد ترک به مقادیری بالاتر از فلز پایه می‌رسد، به‌طوری‌که نمونه‌های جوش کاری شده با سرعت پایین‌تر خواص خستگی بهتری حتی نسبت به فلز پایه دارند. علاوه بر این نتایج نشان می‌دهند، افزایش سرعت دورانی و یا سرعت خطی ابزار باعث افزایش نرخ رشد ترک در نمونه‌های جوش کاری خواهد شد. این نتایج تاثیر مثبت انتخاب

- friction stir aluminum alloy weld*, PhD Thesis, University of Thessaly, Thessaly, Greece, 2015.
- [32] P. Paris, F. Erdogan, A Critical analysis of crack propagation laws, *Journal of Basic Engineering*, Vol. 85, No. 4, pp. 528-533, 1963.
- [33] M. Jayaraman, V. Balasubramanian, Effect of process parameters on tensile strength of friction stir welded cast A356 aluminium alloy joints, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 23, No. 3, pp. 605-615, 3//, 2013.
- [34] Z. Zhang, B. L. Xiao, Z. Y. Ma, Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir welded 2219Al-T6 joints, *Journal of Materials Science*, Vol. 47, No. 9, pp. 4075-4086, 2012.
- [35] T. H. Tra, M. Okazaki, K. Suzuki, Fatigue crack propagation behavior in friction stir welding of AA6063-T5: Roles of residual stress and microstructure, *International Journal of Fatigue*, Vol. 43, No. 1, pp. 23-29, 2012.
- [36] S. Kim, C. G. Lee, S.-J. Kim, Fatigue crack propagation behavior of friction stir welded 5083-H32 and 6061-T651 aluminum alloys, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 478, No. 1, pp. 56-64, 2008.
- [37] R. John, K. Jata, K. Sadananda, Residual stress effects on near-threshold fatigue crack growth in friction stir welds in aerospace alloys, *International Journal of Fatigue*, Vol. 25, No. 9, pp. 939-948, 2003.
- [38] M. James, D. Hattingh, D. Hughes, L. W. WEI, E. Patterson, J. Q. Da Fonseca, Synchrotron diffraction investigation of the distribution and influence of residual stresses in fatigue, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 27, No. 7, pp. 609-622, 2004.
- Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 14, pp. 251-261, 2015. (in persian فارسی)
- [25] P. Cavaliere, A. De Santis, F. Panella, A. Squillace, Thermoelasticity and CCD analysis of crack propagation in AA6082 friction stir welded joints, *International Journal of Fatigue*, Vol. 31, No. 2, pp. 385-392, 2009.
- [26] A. F. Golestaneh, A. Ali, Application of numerical method to investigation of fatigue crack behavior through friction stir welding, *Journal of failure analysis and prevention*, Vol. 9, No. 2, pp. 147-158, 2009.
- [27] P. Carlone, R. Citarella, M. Lepore, G. Palazzo, A FEM-DBEM investigation of the influence of process parameters on crack growth in aluminum friction stir welded butt joints, *International Journal of Material Forming*, Vol. 8, No. 4, pp. 591-599, 2015.
- [28] S. HassaniFard, A. Parghazeh, Fatigue lifetime and crack path prediction in four-point bending test of friction stir Cu-7075-T6 Aluminum alloy welded joints, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 8, pp. 193-198, 2014. (in persian فارسی)
- [29] A. International, Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates, *ASTM International*, West Conchohocken., 2011.
- [30] D. Ghahremani Moghadam, K. Farhangdoost, A. Rastegar, M. Ramezani Moghaddam, Tool's speed effect on hardness and residual stress in friction stir welded Al 2024-T351: Experimental method and Numerical simulation, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 2, pp. 61-71, 2015. (in persian فارسی)
- [31] A. Tzamtzis, *Fatigue crack growth prediction under mode I loading in*