مجله مهندسی مکانیک مدرس، آبان 1393، دوره 14، شماره 8، ص‌ص 193-198

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

تخمین عمر خستگی و مسیر رشد ترک در آزمایش خمش چهار نقطه‌ای اتصال جوش اصطکاکی اغتشاشی مس و آلومینیم 7075-T6

سوران حسنی‌فرد[1*]، امیر پرغازه[2]

1- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

* تبریز، صندوق پستی 5166614766، hasanifard@tabrizu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 04 آذر 1392
پذیرش: 07 دی 1392
ارائه در سایت: 30 شهریور 1393

کلید واژگان:
جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی
مکانیک شکست
پیش‌بینی مسیر انتشار ترک
آزمایش خمش چهارنقطه‌ای
آزمایش خستگی

چکیده

در این مقاله مسیر رشد ترک در آزمایش خمش چهار نقطه‌ای اتصال جوش اصطکاکی اغتشاشی مس و آلومینیم 7075-T6 پیش‌بینی شده و سپس عمر خستگی این اتصال به روش عددی و تجربی تخمین زده می‌شود. برای این منظور آزمایش خمش چهار نقطه‌ای و نیز آزمایش خستگی بر روی نمونه‌های جوشکاری شده انجام گرفته و نتایج مربوط به زاویه انتشار ترک و عمر خستگی هر نمونه استخراج شده است. همچنین با استفاده از معیارهای تنش مماسی بیشینه و $(K_{II})_{min}$ زاویه انتشار ترک پیش‌بینی شده و نیز با استفاده از رابطه نرخ رشد ترک بر حسب ضریب شدت تنش پاریس، عمر ترک خستگی تخمین زده شده است. جهت تعیین خواص مکانیکی نواحی مختلف اتصال جوش اصطکاکی اغتشاشی، مفهوم مواد تابعی مدرج بکار گرفته شده است. بدین منظور، خواص مکانیکی ناحیه جوش از جمله مدول الاستیسیته و نسبت پواسون، به صورت توابعی خطی از موقعیت نقاط ناحیه جوش در نظر گرفته شده‌اند. طبق نتایج بدست آمده در حالتی که شیار اولیه به ماده با چقرمگی بالاتر (مس) نزدیک‌تر باشد، زاویه انتشار ترک کوچکتر خواهد بود. مقایسه نتایج نشان‌دهنده تطابق مناسبی بین داده‌های تجربی و عددی می‌باشد.

Fatigue lifetime and crack path prediction in four-point bending test of friction stir Cu-7075-T6 Aluminum alloy welded joints

Soran Hassanifard[1*], Amir Parghazeh[2]

1- Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran
2- Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran
* P.O.B. 5166614766 Tabriz, Iran, hasanifard@tabrizu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 25 December 2013
Accepted 06 February 2014
Available Online 21 September 2014

Keywords:
Friction Stir Welding
Fracture Mechanics
Crack Path Prediction
Four-Point Bending Test
Fatigue Test

ABSTRACT

In this investigation, kinked crack path of friction stir Cu-Al7075-T6 alloy welded joints in four-point bending test conditions has been studied as well as the fatigue lifetime of the welded joints, numerically and experimentally. To do so, four-point bending and fatigue tests of welded specimens have been carried out and the experimental fatigue test data and the kinked crack angles in bending tests have been extracted. Maximum Tangential Stress (MTS) and $(K_{II})_{min}$ criteria have been used for estimating the kinked crack angles, and Paris law has been applied to predict fatigue crack propagation life of the welded specimens. Functionally graded materials concept has been employed for determining mechanical properties of different regions of welded joints. To do so, the mechanical properties of the weld region such as Young's Modulus and Poisson's ratio have been considered to be linear functions of the positions of the weld region points. It has been shown that, when the original notch is close to the material with the higher fracture toughness (Copper), the kinked crack angle becomes smaller. The results show good agreement between the experimental data and numerical estimations.

1- مقدمه

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی روشی بر پایه حالت جامد بوده که در سال 1991 میلادی در انجمن جوشکاری انگلستان[1] ابداع شده است. اصول این روش بر این اساس است که ابزاری دوار در فلز حرارت و تغییر شکل ایجاد کرده و باعث در هم آمیختن دو فلز در حالت جامد شده و بعد از سرد شدن اتصال شکل می‌گیرد [1]. مهمترین ویژگی این روش، اتصال فلزات غیر همجنس نظیر مس و آلیاژهای آلومینیم می‌باشد. این روش همچنین مزیت‌های فراوانی نسبت به روش‌های سنتی جوشکاری دارد که می‌توان به زمان کمتر جوشکاری، انرژی ورودی کمتر، اعوجاج کمتر و عدم حضور مواد پرکننده و پودرها اشاره کرد [2].

به علت کاربردهای فراوان اتصالات جوش اصطکاکی در صنعت، پدیده خستگی در این اتصال به موضوعی مهم و حساس تبدیل شده است. با وجود

1- The Welding Institute (TWI)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
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)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.8.2.5]

اینکه تاکنون مطالعات فراوانی در زمینه بررسی رشد ترک خستگی در اتصالات جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی انجام گرفته، اما هنوز مشخص کردن تمام ویژگی‌های این پدیده دشوار است. ترا و همکاران [1] نشان دادند که نرخ رشد ترک خستگی به موقعیت ترک و رفتار دمایی ماده پس از جوشکاری وابسته می‌باشد. بوسو و ایروینگ [3] و فرینی و همکاران [4] بر روی تأثیر تنش پسماند بر عمر خستگی اتصالات جوش اصطکاکی مطالعاتی را انجام دادند. فرسینی و پیرندی [5] و نیز شارما ویشرا [6] نیز به بررسی عمر خستگی اتصال جوش اصطکاکی آلیاژهای آلومینیمی پرداختند. کاوالیا و پانلا [7] به بررسی اثر موقعیت ابزار بر عمر خستگی اتصالات جوش اصطکاکی مواد ناهمجنس پرداختند. اریکسون و همکاران [8] با بررسی خصوصیات خستگی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی دریافتند که شکست در ناحیه تحت تنش بالا و در سطح مشترک دو ورق رخ می‌دهد. طبق آزمایش‌های آنان، ابزار با پین محدبی شکل بهترین عملکرد را در خستگی دارد. متز و بارکی [9] با تمرکز بر رفتار خستگی جوش اصطکاکی اغتشاشی ورق آلومینیم 2195 و لیتیم به بررسی اثر پین در انتهای مسیر پرداختند. آنها نشان دادند که اثر پین در انتهای فرایند باعث کاهش مقاومت نهایی و عمر خستگی این اتصالات می‌شود. گلستانه و همکاران [10] گسترش ترک خستگی را در جوش اصطکاکی اغتشاشی آلومینیم 2024 مدل کرده و همچنین عمر خستگی آن را با استفاده از مدل واکر و نیکولاس تخمین زدند. آنها دریافتند که هر دو مدل نتایج قابل قبولی را ارائه می‌کنند. اگرچه نتایج مدل واکر دقت بالاتری نسبت مدل نیکولاس دارد

اخیراً نیز مطالعات دیگری در زمینه تعیین رفتار و عمر خستگی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی انجام گرفته است که از آن جمله می‌توان به مطالعات حسنی‌فرد و همکاران [11،12] و نیز وانگ و چن [13] اشاره کرد. با این وجود نیز نیاز به مطالعات بیشتری در زمینه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی فلزات ناهمجنس در بسیاری از زمینه‌ها نظیر مقاومت خستگی و پیش‌بینی مسیر انتشار ترک، احساس می‌شود. بنابراین در این مقاله مسیر انتشار ترک در آزمایش **خمش** چهار نقطه‌ای تحت بارگذاری‌های متفاوت پیش‌بینی شده و نیز عمر خستگی انتشار ترک در اتصال جوش اصطکاکی اغتشاشی آلومینیم 7075-T6 و مس تعیین شده و سپس نتایج عددی با استفاده از نتایج تجربی مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

2- مطالعات تئوری

2-1- معیارهای پیش‌بینی مسیر انتشار ترک

معیارهای فراوانی برای پیش‌بینی مسیر انتشار ترک در مواد همگن موجود است، مانند معیار تنش مماسی بیشینه، $(K_{II})_{min}$، حداکثر نرخ انرژی کرنشی آزاد شده و چگالی انرژی کرنشی کمینه. برای مواد ناهمگن یا موادی که در فصل مشترک آنها می‌توان فرضیه همگن بودن موضعی را اعمال نمود، می‌توان از تئوری‌های مربوط به مواد همگن اسفاده نمود [14]. در این مقاله نیز از فرض همگن بودن موضعی استفاده شده است. در میان معیارهای اشاره شده، به اختصار به توضیح دو مورد پرداخته می‌شود.

اردوغان و سیه [15] مدل تنش مماسی بیشینه را ارائه نمودند. طبق این معیار ترک در جهتی رشد می‌کند که تنش مماسی بیشینه وجود دارد. بنابراین زاویه شروع ترک θ_0 با استفاده از رابطه (1) تعیین می‌شود [14].

$$\frac{\partial \sigma_{\theta\theta}}{\partial \theta} = 0, \quad \frac{\partial^2 \sigma_{\theta\theta}}{\partial \theta^2} < 0 \rightarrow \quad \theta = \theta_0 \qquad (1)$$

شکل 1 نشان دهنده دستگاه مختصات قطبی و کارتزین در نوک ترک می‌باشد. برای ترک در حالت الاستیک خطی، تنش مماسی از رابطه (2) بدست می‌آید.

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} cos\frac{\theta}{2}[K_I cos^2\frac{\theta}{2} - \frac{3}{2}K_{II} sin\theta] \qquad (2)$$

با جایگذاری $\sigma_{\theta\theta}$ از رابطه (2) در رابطه (1)، رابطه (3) حاصل می‌شود:

$$\cos\frac{\theta_0}{2}[K_I \sin\theta_0 + K_{II}(3\cos\theta_0 - 1)] = 0 \qquad (3)$$

با محاسبه زاویه انتشار ترک، شرایط انتشار ترک نیز از رابطه (4) بدست می‌آید.

$$\sqrt{2\pi r}(\sigma_{\theta\theta}) = \cos\frac{\theta_0}{2}\left[K_I \cos^2\frac{\theta_0}{2} - \frac{3}{2}K_{II}\sin\theta_0\right] = K_{Ic}(x) \qquad (4)$$

معیار بیشینه نرخ انرژی کرنشی آزاد شده برای مواد همگن توسط حسین و همکاران [16] ارائه شده است. آنها دریافتند که ترک تحت بارهای ترکیبی در جهتی انتشار می‌یابد که نرخ انرژی کرنشی آزاد شده، بیشینه باشد.

معیار $(K_{II})_{min}$ بر پایه این فرض استوار است که ترک همواره در جهت مود I انتشار می‌یابد. به عبارت دیگر ترک در جهتی انتشار می‌یابد که تنش‌ها در نوک ترک متقارن بوده و مقدار K_{II} کمینه باشد [17].

2-2- انتشار ترک خستگی و تخمین عمر خستگی

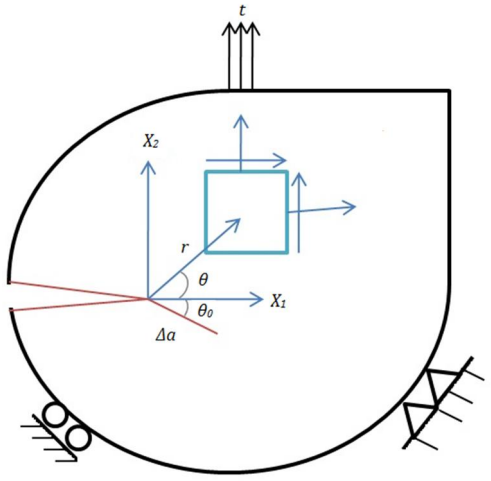
زمانی که ترک در نمونه وجود دارد، بارگذاری چرخه‌ای باعث انتشار و رشد آن شده و در نهایت منجر به شکست می‌شود. رابطه بین نرخ رشد ترک خستگی به ازای هر دور da/dN، و ضریب شدت تنش معادل ΔK با استفاده از رابطه (5) تعریف می‌شود [18].

$$\frac{da}{dN} = c(\Delta K)^m \qquad (5)$$

در رابطه (5)، C و m ثوابت تجربی بوده و N تعداد دورهای منجر به شکست و a طول ترک و $\Delta K = \sqrt{K_I^2 + K_{II}^2}$ می‌باشند. بیان ساده‌تر رابطه پاریس به بصورت رابطه (6) ارائه می‌گردد [19].

$$\frac{da}{dN} = \bar{c}\left(\frac{\Delta K}{E}\right)^2 \qquad (6)$$

که در رابطه (6) نیز $\bar{c}$ ثابت تجربی بوده تقریباً برابر 3 فرض می‌شود و E مدول الاستیسیته بر حسب مگاپاسکال می‌باشد. با انتگرال‌گیری از رابطه (6)،



شکل 1 دستگاه مختصات کارتزین و قطبی در نوک ترک

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.8.2.5]

رابطه (7) برای تخمین عمر خستگی بدست می‌آید:

$$N_1 - N_0 = \frac{E^2}{3(\Delta K)^2}(a_1 - a_0) \quad (7)$$

رابطه (7) مستقل از ثوابت رابطه پاریس بوده و تنها وابسته به مدول الاستیسیته می‌باشد که در جهت تغییرات ماده، متغیر است.

3- آزمایش‌های تجربی

3-1- مواد و نمونه‌ها

ساخت نمونه‌های جوش اصطکاکی اغتشاشی مس و آلومینیم 7075-T6 با استفاده از دستگاه فرز TNC 155 انجام گرفته است. ابزار جوشکاری از جنس سیلیکون کاربید بوده که قطر خارجی آن 19 میلی‌متر و قطر پین 5 میلی‌متر و ارتفاع پین 2 میلی‌متر و در وسط ابزار قرار گرفته است.

مؤلفه‌های مناسب در فرایند جوشکاری با انجام آزمایش‌های متعدد تعیین شد که در آن: سرعت خطی ابزار v=16 mm/min، سرعت دورانی ابزار n=900 rpm، عمق نفوذ پین در نمونه p=1.8 mm و زاویه انحراف ابزار 2/5 درجه می‌باشد. شکل 2 نمونه‌ای از اتصال انجام گرفته را نشان می‌دهد. خصوصیات مکانیکی مس و آلومینیم T6-7075 در جدول 1 ذکر شده است. ابعاد نمونه ساخته شده 30×140 میلی‌متر مربع بوده و ضخامت نمونه‌ها 2 میلی‌متر می‌باشد. در نمونه آماده شده برای آزمایش خستگی شیار اولیه بطول 10 میلی‌متر تنها در مرکز خط جوش ایجاد شده ولی در آزمایش خمش چهار نقطه‌ای شیار اولیه به طول10 میلی‌متر در سه موقعیت نزدیک به مس، ناحیه مرکزی و نزدیک به آلومینیم ایجاد شده است.

3-2- آزمایش خمش چهارنقطه‌ای

آزمایش خمش چهار نقطه‌ای با استفاده از دستگاه هیدرولیک روئل-امسلر انجام گرفته و نتایج برای سه نوع نمونه شیاردار در ناحیه جوش بدست آمده که این نتایج در جدول 2 ذکر شده است. در این آزمایش ابعاد نمونه ساخته شده 30×140 میلی‌متر مربع بوده و ضخامت نمونه‌ها 2 میلی‌متر و شیار اولیه به طول10 میلی‌متر و در سه موقعیت نزدیک به مس، نزدیک به آلومینیم و ناحیه مرکزی ایجاد شده است. زاویه انتشار ترک و نیز بار بحرانی شکست از این آزمایش استخراج شده است. مکان شیار اولیه نسبت به مس و از ابتدای ناحیه جوش تعیین شده است، $n=x/w$ که در آن w عرض ناحیه جوش می‌باشد. آزمایش توسط دستگاه پرس و تکیه‌گاه نشان‌داده شده در شکل 3 انجام گرفته است. در شکل 4 زاویه انتشار ترک خستگی در یکی از

جدول 1 خصوصیات مکانیکی مس و آلومینیم T6-7075 [11]

خصوصیات مواد	چقرمگی شکست ($MPa\sqrt{m}$)	نسبت پواسون	مدول یانگ (GPa)
مس	110	0/34	117
آلومینیم (7075-T6)	26	0/32	71/2

شکل 2 نمونه اتصال جوش اصطکاکی اغتشاشی مس و آلومینیم 7075-T6

جدول 2 نتایج آزمایش خمش چهار نقطه‌ای

موقعیت شیار	بار بحرانی شکست (N)	زاویه رشد ترک (درجه)
n= 20 %	1840	7/4
n= 50 %	1500	8/6
n= 80 %	1320	10/5

شکل 3 دستگاه پرس و قید مربوطه

شکل 4 زاویه انتشار ترک در نمونه جوشکاری شده تحت آزمایش خمش چهار قطه‌ای (n= 80%)

نمونه‌ها (شیار اولیه نزدیک به آلیاژ آلومینیم، n=80%) بعد از انجام آزمایش خمش چهار نقطه‌ای نشان داده شده است.مبنای تخمین زاویه انتشار ترک، زاویه بین خط اولین انحراف ترک با خط عمودی و همراستای شیار اولیه فرض شده است. مشاهده می‌گردد که زاویه انتشار ترک به سمت فلز با چقرمگی بالاتر می‌باشد.

3-3- آزمایش خستگی

در این پژوهش آزمایش خسستگی با استفاده از دستگاه آزمایش خستگی 250 کیلو نیوتنی سرو هیدرولیک زوئیک-امسلر انجام گرفته است. در این آزمایش شیار اولیه بطول 10 میلی‌متر در ناحیه مرکزی خط جوش ایجاد شده و نسبت نیروی کمینه به بیشینه 0/1 می‌باشد. ابعاد نمونه ساخته شده برای آزمایش خستگی30×140 میلی‌مترمربع و ضخامت آن 2 میلی‌متر می‌باشد. عمر خستگی نمونه‌ها بر اساس بارگذاری اعمال‌شده در نمودار نیمه لگاریتمی شکل 5 نشان داده شده است.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.8.2.5]

4- مدل‌سازی عددی

4-1- مدل‌سازی عددی آزمایش خمش چهار نقطه‌ای

در این بخش جوش اصطکاکی لب به لب ورق آلومینیم 7075-T6 به ضخامت 2 میلی‌متر و مس خالص با استفاده از نرم‌افزار المان محدود انسیس مدل‌سازی می‌شود. هندسه نمونه و ابزار در شکل 6 نشان داده شده است.

به علت تغییر خصوصیات مواد در راستای عمود بر خط جوش، مدل‌سازی خصوصیات مواد و نیز رشد ترک، فرایندی پیچیده می‌باشد. برای رفع مشکل ارجاع خصوصیات مواد، از کدنویسی انسیس استفاده شده است. بدین ترتیب که در این نرم‌افزار امکان تعریف خصوصیات مواد بصورت تابعی از دما وجود داشته و سپس با استفاده کدنویسی دما به مکان مرتبط شده است. تعریف خصوصیات مواد بصورت تابع دما در روابط (8) و (9) نشان داده شده است.

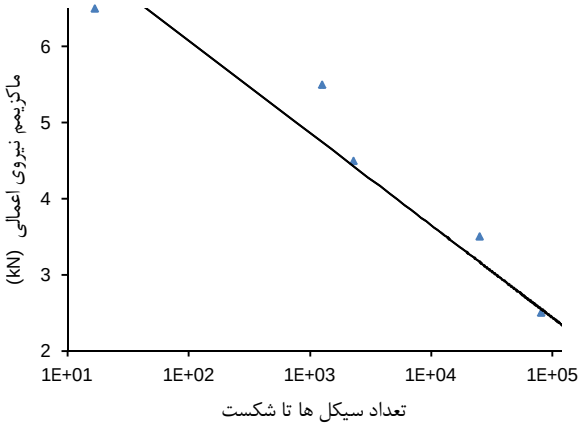
$$E(T) = E_0 + E_1 T \quad (8)$$

$$\upsilon(T) = \upsilon_0 + \upsilon_1 T \quad (9)$$

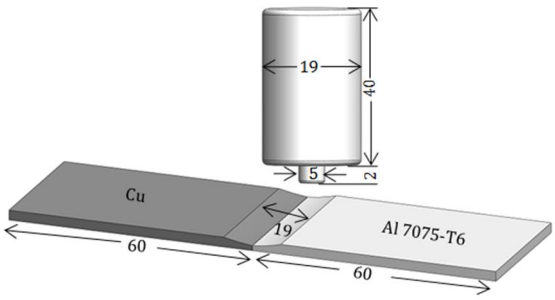
لازم به ذکر است که از این روش فقط برای تعریف خواص مکانیکی متغیر با موقعیت نقاط استفاده شده و تحلیل حرارتی مد نظر نمی‌باشد. برای مش-بندی نمونه، مش‌بندی آزاد با المان‌های چهارضلعی صفحه‌ای ایزوپارامتریک انجام شده است. شیار اولیه مطابق شکل 7 در سه مکان از ناحیه جوش ایجاد شده است (نزدیک به مس، ناحیه میانی و نزدیک به آلومینیم).

4-2- مدل‌سازی عددی آزمایش خستگی

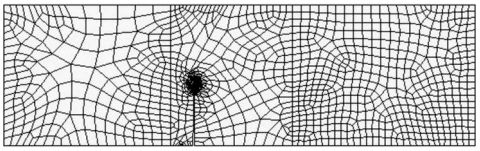
برای تخمین عمر خستگی، مدل دو بعدی المان محدود ایجاد شده است. در این حالت نیز مش‌بندی با المان‌های چهارضلعی ایزوپارامتریک و تحت



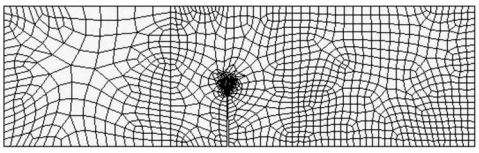
شکل 5 نتایج بدست آمده از عمر خستگی نمونه‌ها بر حسب بارگذاری اعمال‌شده در آزمایش خستگی



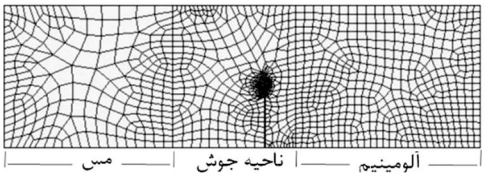
شکل 6 هندسه نمونه و ابزار جوش لب به لب اصطکاکی اغتشاشی



الف) نزدیک به مس



ب) ناحیه میانی



ج) نزدیک به آلومینیم

شکل 7 موقعیت ترک در نواحی مختلف

شرایط مش‌بندی آزاد انجام شده است. برای دست‌یابی به نتایج دقیق‌تر در نوک ترک از المان‌های ریزتر استفاده شده است.

برای یافتن عمر خستگی با استفاده از روش المان محدود در نرم‌افزار انسیس، اتصال جوش‌اصطکاکی اغتشاشی آلومینیم و مس در نرم‌افزار مدل شده و و ناحیه جوش به عرض 19 میلی‌متر و شیار اولیه به طول 10 میلی‌متر ایجاد گردیده است. این نمونه تحت بارگذاری کشش ساده قرار گرفته و ضرایب شدت تنش در هر بارگذاری استخراج شده است. سپس با استفاده از این ضرایب و رابطه واکر عمر خستگی به ازای طول ترک‌های مختلف (1، 2، 4 و 6 میلی‌متر) بدست آمده است. هر کدام از این طول ترک‌ها به ترتیب در نرم‌افزار مدل شده و ضرایب شدت تنش معادل هرکدام استخراج گردیده است. در نهایت با جمع عمر خستگی مربوط به هر بارگذاری در طول ترک-های ذکر شده، عمر نهایی مربوط به آن بارگذاری قابل تخمین می‌باشد. با استفاده از چقرمگی بحرانی مشخص می‌شود که با رسیدن طول ترک به مقدار بیشتر از 6 میلی‌متر، شکست اتفاق افتاده، لذا بیشینه طول ترک 6 میلی‌متر می‌باشد.

5- بحث و نتیجه‌گیری

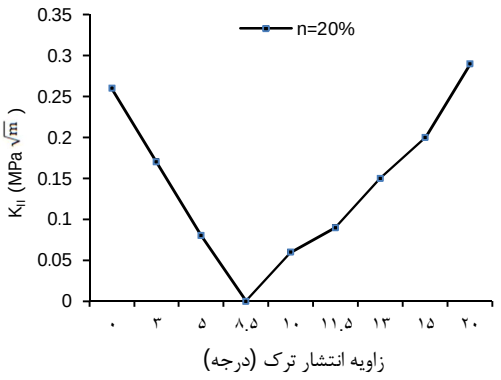
5-1- نتایج مدل‌سازی آزمایش خمش چهار نقطه‌ای

برای پیش‌بینی زاویه انتشار ترک با استفاده از معیار $K_{II}=0$، ضریب مود II شدت تنش برای نمونه‌های شیاردار در جهات مختلف بدست آمده است. طبق معیار $(K_{II})_{min}$ انتشار ترک در جهتی ادامه می‌یابد که ضریب شدت تنش مود دوم در آن جهت صفر باشد. بر همین اساس در این مقاله با استفاده از مدل‌سازی المان محدود، جهات مختلف برای رشد ترک انتخاب شده و در هر جهت ضرایب شدت تنش استخراج شده است. با رسم مقادیر K_{II} بر حسب زوایای انتخابی برای انتشار ترک، کمینه مقدار K_{II} در هر زاویه، مبین زاویه انتشار ترک با استفاده از این روش می‌باشد.

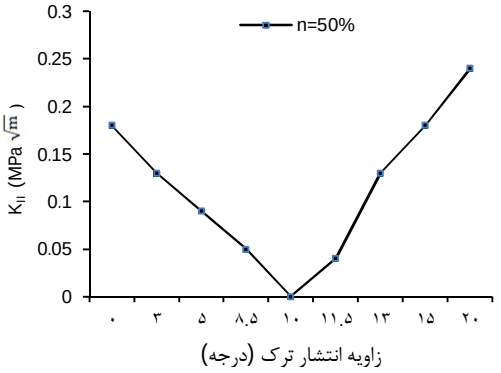
در شکل 8 تغییرات مقدار K_{II} بر حسب زاویه انتشار ترک برای هر سه حالت قرارگیری شیار اولیه رسم شده است.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

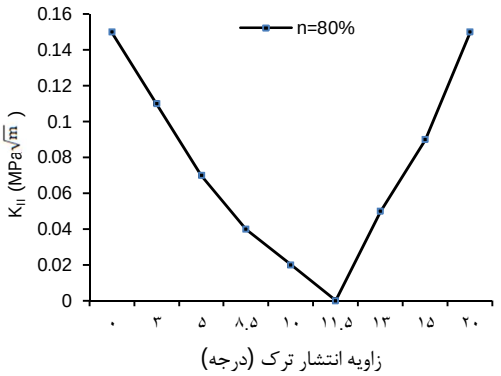
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.8.2.5]



الف) n=20%



ب) n=50%



ج) n=80%

شکل 8 تغییرات K_{II} بر حسب زوایای انتشار ترک در حالات مختلف

نتایج عددی ضرایب شدت تنش مود I و مود II، و زاویه انتشار ترک با استفاده از معیار تنش مماسی بیشینه (MTS) و K_{II}=0 در جدول 3 ذکر شده است.

می‌توان نتیجه گرفت که نتایج معیارهای تنش مماسی بیشینه و K_{II}=0 تطابق مناسبی با همدیگر دارند.

5-2- نتایج مدل‌سازی عددی آزمایش خستگی

ضریب شدت تنش معادل بدست آمده از مدل‌سازی المان محدود آزمایش خستگی در جدول 4 ذکر شده است. با جایگذاری ΔK در رابطه (7)،

جدول 3 نتایج عددی ضریب شدت تنش مود I و II، تخمین زوایای انتشار ترک و بار بحرانی استاتیکی شکست برای شیار اولیه 10 میلی‌متر

موقعیت ترک	بار بحرانی شکست (N)	K_{II} (MPa $\sqrt{m}$)	K_I (MPa $\sqrt{m}$)	زاویه انتشار ترک (درجه) $(K_{II})_{min}$	زاویه انتشار ترک (درجه) MTS
n= 20 %	2074	0/24	97/7	8/5	5/5
n= 50 %	1980	0/13	73/7	10	6/2
n= 80 %	1705	0/10	54/3	11/5	8/3

جدول 4 مقادیر ضریب شدت تنش معادل بدست آمده از تحلیل المان محدود

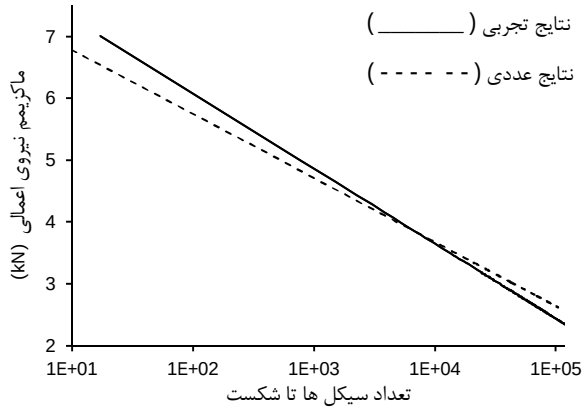
P_{max} (kN)	a=1mm	a=2mm	a=4mm	a=6mm
	ΔK (MPa $\sqrt{m}$)			
1	6/3	17/4	33/1	51/2
2	9/7	22/1	39/9	62/3
3	23/8	42/9	75/1	92/4
4	30/4	56/1	83/8	101/2
5	43/2	67/7	94/6	108/4

عمر خستگی برای هر کدام از طول ترک‌ها محاسبه شده و در نهایت با جمع عمرهای خستگی برای یک بارگذاری مشخص (با نسبت بار R=0/1)، عمر خستگی هر نمونه بدست می‌آید. نتایج مربوط به عمر خستگی و همچنین مجموع آنها برای یک بارگذاری مشخص در جدول 5 ذکر شده است.

عمر انتشار ترک خستگی نمونه‌ها بر حسب بیشینه بار اعمال شده در نمودار نیمه لگاریتمی شکل 9 نشان داده شده است. همچنین نتایج عددی بدست آمده از تحلیل المان محدود و نتایج تجربی بدست آمده از آزمایش خستگی در این شکل مقایسه شده‌اند. ملاحظه می‌شود که نتایج تطابق مناسبی باهم دارند.

6- نتیجه‌گیری

در این مقاله جوش اصطکاکی اغتشاشی مواد ناهم‌جنس مورد بررسی قرار گرفته است. جهت تخمین زاویه انتشار ترک تحت آزمایش خمش چهار نقطه‌ای از معیارهای تنش مماسی بیشینه و نیز $(K_{II})_{min}$ استفاده شده است. طبق نتایج بدست آمده در حالتی که شیار اولیه به ماده با چقرمگی بالاتر (مس) نزدیکتر باشد، زاویه انتشار ترک کوچک‌تر خواهد بود، اگرچه در این



شکل 9 مقایسه نتایج المان محدود و نتایج آزمایش خستگی برای تخمین عمر خستگی نمونه جوش اصطکاکی اغتشاشی

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.8.2.5]

حالت بار بحرانی شکست مربوطه بزرگ‌تر می‌شود. بنابراین در حالتی که شیار اولیه نزدیک به مس می‌باشد، با توجه به نتایج آزمایش تجربی، زاویه انتشار ترک 7/4 درجه و نیروی شکست آن 1840 نیوتن می‌باشد و با نزدیک شدن شیار اولیه به سمت آلومینیم، زاویه انتشار ترک، به 10/5 درجه افزایش یافته و نیروی بحرانی شکست به مقدار 1320 نیوتن کاهش می‌یابد. این روند در مدل‌سازی عددی با استفاده از دو معیار تنش مماسی بیشینه و $(K_{II})_{min}$ نیز مورد تأیید قرار می‌گیرد. تفاوت ناچیز بین نتایج عددی و تجربی، به علت عیوب ظاهر شده در هنگام ساخت نمونه‌های تجربی جوش اصطکاکی می‌باشد. این عیوب باعث کاهش نیروی بحرانی و افزایش زاویه انتشار ترک در آزمایش تجربی خمش چهار نقطه‌ای خواهد شد. همچنین عمر انتشار ترک خستگی با استفاده از روش مکانیک شکست و روش المان محدود تعیین شده و نتایج با آزمایش تجربی مورد ارزیابی قرار گرفته است. در هردو حالت، بین نتایج عددی و آزمایش‌های تجربی تطابق مناسبی وجود دارد.

7- مراجع

[1] T. H. Tra, M. Okazaki, K. Suzuki, Fatigue crack propagation behaviors 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.

[2] H. Uzun, C. D. Donne, A. Aragagnotto, T. Ghidini, C. Gambaro, Friction stir welding of dissimilar Al 6013-T4 to X5CrNi18-10 stainless steel, *Materials and design,* Vol. 26, No. 1, pp. 41-46, 2005.

[3] G. Busu, P. E. Irving, The role of residual stress and heat affected zone properties on fatigue crack propagation in friction stir welded 2024-T351 Aluminum joints, *International Journal of Fatigue,* Vol. 25, No. 1, pp. 77-88, 2003.

[4] L. Ferrini, S. Pasta and A. P. Reynolds, Fatigue crack growth in 2024-T351 friction stir welded joints: longitudinal residual stress and microstructure effects, *International Journal of Fatigue,* Vol. 31, No. 3, pp. 495-500, 2009.

[5] D. Fersini, A. Pirondi, Fatigue behavior of Al2024-T3 friction stir welded lap joints, *Engineering fracture mechanics,* Vol. 74, No. 1, pp. 468-480, 2007.

[6] S. R. Sharma, R. S. Mishra, Fatigue crack growth behavior of friction stir processed aluminum alloy, *Scripta Mater,* Vol. 59, No. 4, pp. 395-408, 2008.

[7] P. Cavaliere, F. Panella, Effect of tool position on the fatigue properties of dissimilar 2024-7075 sheets joined by friction stir welding, *Journal of material process technology,* Vol. 206, No. 1, pp. 249-255, 2008.

[8] M. Ericsson, L. Z. Jin, R. Sandstrom, Fatigue properties of friction stir overlap welds, *International Journal of Fatigue,* Vol. 20, No. 1, pp. 57-68, 2007.

[9] D. F. Metz, M. E. Barkey, Fatigue behavior of friction plug welds in 2195 Al-Li alloy, *International journal of fatigue,* Vol. 43, No. 1, pp. 178-187, 2012.

[10] A. F. Golestaneh, A. Ali, M. Zadeh, Modeling the fatigue crack growth in friction stir welded joints of 2024-T351 Al alloy, *Materials and design,* Vol. 30, No. 1, pp. 2928-2937, 2009.

[11] S. Rash Ahmadi, S. Hassanifard, and M. Mohammad Pour, "Fatigue life prediction of friction stir spot welds based on cyclic strain range with hardness distribution and finite element analysis, *Acta Mech,* Vol. 223, No. 1, *PP.* 829-839, 2012.

[12] S. Hassanifard, S. Rash Ahmadi, and M. Mohammad Pour, Weld arrangement effects on the fatigue behavior of multi friction stir spot welded joints, *Materials and Design,* Vol. 44, No. 1, pp. 291-302, 2013.

[13] D.A. Wang, C.H. Chen, Fatigue lives of friction stir spot welds in aluminum 6061-T6 sheets, *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 209, No. 1, pp. 367-375, 2009.

[14] J. H. Kim, G. H. Paulino, On fracture criteria for mixed-mode crack propagation in functionally graded materials, *Mechanics of advanced materials & structures,* Vol. 14, No. 1, pp. 227-244, 2007.

[15] F. Erdogan, G. C. Sih, On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear, *Basic Eng. ASME Trans. Journal,* Vol. 85, No. 1, pp. 519-525, 1963.

[16] M. A. Hussain, S. L. Pu and J. H. Underwood, Strain energy release rate for a crack under combined mode I and mode II, *Fracture Analysis, ASTM STP,* pp. 560 2-28, 1993.

[17] S. Goldstein, Brittle fracture of solids with arbitrary cracks, *International Journal of Fatigue,* Vol. 10, No. 4, pp. 507-523, 1974.

[18] P. Paris and F. Erdogan, A critical analysis of crack propagation laws, *Journal of basic engineering,* Vol. 85, No. 1, pp. 528-534, 1963.

[19] N. A. Fleck, K. J. Kang and M. F. Ashby, The cyclic properties of engineering materials, *Acta metal. Mater.*, Vol. 42, No. 2, pp. 365-381, 1994.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.8.2.5]