مجله مهندسی مکانیک مدرس، فروردین 1396، دوره 17، شماره 1، ص‌ص 365-374

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی اثر پیش‌عملیات مکانیکی اغتشاش اصطکاکی بر آسیب نرم وابسته به حالت تنش در آلیاژ آلومینیوم 7075-T6

مجید علی‌طاولی[1*]، سینا گوهری‌راد[2]، اصغر زاجکانی[3]، ابوالفضل درویزه[4]

1- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت
2- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت
3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین
4- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت
*رشت، صندوق‌پستی 41635-3756، tavoli@guilan.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 25 مهر 1395
پذیرش: 26 آذر 1395
ارائه در سایت: 29 دی 1395

کلید واژگان:
آسیب نرم پدیدارشناختی
پیش‌عملیات مکانیکی
اغتشاش اصطکاکی
مدل ژو
مدل هاسفورد-کلمب

چکیده

در این مقاله اثر پیش عملیات اغتشاش اصطکاکی بر روند تکامل آسیب در آلومینیوم 7075-T6 با استفاده از یک مدل پدیدارشناختی آسیب وابسته به حالت تنش بررسی می‌شود. قطعاتی از ورق این آلیاژ در حالت‌های بدون و با پیش عملیات اغتشاش اصطکاکی استخراج می‌گردند به‌گونه‌ای که هریک مبین یک حالت تنش در آزمایش کشش تک محوره است. با استفاده از نتایج آزمایشگاهی ضرایب مادی برای مدل‌های مختلف آغاز شکست ژو و هاسفورد-کلومب تعیین می‌شوند و سطح شکست برحسب پارامترهای حالت تنش برای شرایط بدون و با پیش عملیات اغتشاش اصطکاکی با استفاده از هرکدام از این دو مدل به‌دست می‌آیند. به کمک این سطوح می‌توان کرنش شکست را در حالت‌های مختلف تنش و در شرایط بدون و با پیش عملیات اغتشاش اصطکاکی برای این ماده به‌دست آورد. یک مدل پدیدارشناختی آسیب وابسته به حالت تنش و رشد آن برای شرایط مختلف بدون و با پیش عملیات اغتشاش اصطکاکی برای ماده مذکور مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج آزمایش‌ها نشان‌دهنده افزایش کرنش پلاستیک ماده در نتیجه اثرات پیش عملیات اغتشاش اصطکاکی و مدل آسیب نشان‌دهنده کاهش فرآیند رشد آسیب نرم بر اثر این پیش عملیات است. با مقایسه نتایج مدل آسیب از دو مدل آغاز شکست مختلف ژو و هاسفورد-کلومب نتیجه گرفته می‌شود که مدل ژو نتایج بهتری را در مقایسه با مدل هاسفورد-کلومب نشان می‌دهد و از این مدل می‌توان با قابلیت اعتماد بیشتری در پیش‌بینی رشد آسیب در این ماده استفاده کرد و سطح شکست به‌دست‌آمده از این مدل سازگاری بهتری با نتایج آزمایشگاهی دارد

Influence of Pre-Mechanical Friction Stir Processing on Stress State Dependent Ductile Damage of 7075-T6 Aluminum Alloy

Majid Alitavoli[*1], Sina Gohari Rad[1], Asghar Zajkani[2], Abolfazl Darvizeh[1]

1- Department of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran
2- Department of Mechanical Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran
* P.O.B. 41635-3756, Rasht, Iran, tavoli@guilan.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 16 October 2016
Accepted 16 December 2016
Available Online 18 January 2017

Keywords:
Phenomenological ductile damage
Pre-Mechanical Working
friction stir
Xue model
Hosford-Coulomb Model

ABSTRACT

In this paper, the effects of friction stir pre-mechanical processing on damage evolution of 7075-T6 aluminum alloy has been investigated by implementation of stress state dependent damage model which is described in a phenomenological way. In this regards, a series of specimens with specific geometry were designed from sheet with and without friction stir pre-mechanical processing. Each of these specimens represents a particular stress state at fracture location in uniaxial tensile test. Material parameters for two different fracture initiation models, Xue and Hosford-Coulomb, are determined using experimental results. Based on these models, plastic strain to fracture surface at stress state parameters are determined with and without pre-mechanical friction stir conditions. The obtained fracture surfaces can be used to specify strain plastic to fracture for any given stress state for this material. Moreover, a phenomenological stress state dependent damage model and its evolution were investigated for this material with and without friction stir pre-mechanical processing condition using these models. The experimental results showed an increase in plastic strain of the material due to pre-mechanical friction stir processing, while damage model showed a decrease in evolution of ductile damage due to this pre-mechanical processing. Comparing the damage results obtained from two different fracture initiations, it was shown that Xue fracture initiations model leads to more reasonable results than Hosford-Coulomb model. Therefore Xue model yields more reliability in predicting evolution of internal damage for this material. Besides, this model fracture surface is in good agreement with the conducted experimental results.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Alitavoli, S. Gohari Rad, A. Zajkani, A. Darvizeh, Influence of Pre-Mechanical Friction Stir Processing on Stress State Dependent Ductile Damage of 7075-T6 Aluminum Alloy, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 1, pp. 365-374, 2017 (in Persian)

1- مقدمه

در سال‌های اخیر اهمیت پیش‌بینی آسیب نرم[1] در فلزات در بسیاری از کاربردهای صنعتی افزایش یافته است. آسیب داخلی می‌تواند به‌صورت وجود و رشد ترک‌ها و حفره‌ها در سطح میکروسکوپی تعریف شود که سرانجام منتهی به از دست دادن کامل ظرفیت تحمل بار یا همان واماندگی[2] در مواد می‌شود. عبارت واماندگی نرم[3] به‌صورت مبهم در کارهای گذشته و بیشتر با دو معنی استفاده شده است. در تحقیقات میکرومکانیکی بیشتر به عنوان نوع واماندگی در نتیجه حفره‌زایی، رشد و به‌هم‌آمیختگی حفره‌ها در درون ماده استفاده شده است. از سوی دیگر این مفهوم برای کاربردهایی در ابعاد بزرگ‌تر به تغییر شکل‌های بزرگ مواد که پیش از واماندگی رخ می‌دهد اشاره دارد. در این مقاله این مفهوم به معنای کرنش پلاستیک معادل[4] برای تشکیل واماندگی در مکانی بحرانی به‌کار می‌رود که همچنین می‌تواند با صرف نظر کردن از قسمت الاستیک در تغییر شکل‌های بزرگ آن را کرنش واماندگی[5] نیز نامید. تمایل بسیاری به جای‌گزینی آلیاژهای آلومینیومی با وزن کم و استحکام بالا به‌جای فولادها برای کاهش آلودگی وجود دارد [1]. سری 7000 (با ترکیب آلیاژی Al-Zn-Mg-Cu از میان رده‌های گوناگون آلیاژهای آلومینیوم با استحکام بالا خواص عالی چون چگالی به‌نسبت کم، استحکام مشخص بالا و مقاومت خوب در برابر خوردگی را در بر دارند. آلیاژ آلومینیوم 7075-T6 مقاومت بالایی را به‌نسبت وزن خود نشان می‌دهد و از این‌رو به طور گسترده‌ای در صنایع هوافضا مانند ساخت بال‌ها و نوک دماغه هواپیما به‌کار می‌رود، همچنین در تجهیزات کوهنوردی و اجزای دوچرخه به دلیل استحکام بالا و وزن کم این آلیاژ کاربرد بسیار دارد. از این‌رو بسیاری از محققان به مطالعه و بررسی رفتار مکانیکی این آلیاژ به‌خصوص در حوزه رفتار پلاستیک تحت شرایط مختلف پرداخته‌اند. از جمله کارهای اخیر می‌توان به تحلیل تجربی و شبیه‌سازی المان محدود صورت گرفته توسط دی چنگ چن و همکارانش اشاره کرد [2]. ایشان و همکارانش عوامل مؤثر بر شکست نرم چون تنش، کرنش و مقدار آسیب را تحلیل کرد. معیار شکست نرم کوککرافت و لاتم[6] به‌کار رفته در شبیه‌سازی المان محدود آن‌ها دقت بیشتری را نسبت به دیگر معیارهای شکست نشان داد.

معمولاً از دست دادن ظرفیت تحمل بار وابسته به فشار هیدرواستاتیکی در نظر گرفته می‌شود، در صورتی که حالت تنش براساس دو پارامتر تنش هیدرواستاتیکی و زاویه لود[7] مشخص می‌شود. مدل میکرومکانیکی آسیب گارسون- تورگارد- نیدلمن[8] از مدل‌های معروف آسیب که در آن پارامتر زاویه لود نادیده گرفته شده است [3]. هنگامی که مدل‌کردن محلی و واماندگی برای تنش‌های سه محوره[9] کم و تغییرشکل‌های ناشی از برش مورد نظر باشد به دلیل از قلم افتادگی پارامتر لو د،پاسخ مناسبی را به‌دست نمی‌آورد و به همین دلیل این مدل به‌وسیله بسیاری از محققان توسعه یافته است. ژو [4] و ناهشون و هاتچینسون [5] مدل آسیب را به روش پدیدارشناختی برای محاسبه تغییر شکل برشی و وابستگی به لود بهینه کردند. بررسی اثر حالت تنش و پیش‌عملیات مکانیکی بر آسیب و رشد آن در این آلیاژ آلومینیوم مساله‌ای که در تحقیقات انجام‌شده مورد بررسی قرار نگرفته و کمتر به آن توجه شده است. بسیار مهم است که وابستگی آسیب به حالت تنش و همچنین اثر پیش عملیات مکانیکی در مواد فلزی شناخته شود تا بتوان از چگونگی تغییر در ریزساختار و اثرات آن بر استحکام ماده و تغییرات بر آسیب و رشد آن در تغییر شکل‌های پلاستیک ماده پس از انجام عملیات مکانیکی بر ماده مطلع شد. فرآیند اغتشاش اصطکاکی[10] یکی از این پیش‌عملیات‌های مکانیکی است. نیلسن گسترش آسیب نرم در یک اتصال آلومینیوم به آلومینیوم روش جوش‌کاری اصطکاکی را به روش المان محدود تحلیل کرده و تمرکز اصلی کار خود را بر گسترش آسیب و محل شکست نهایی قرار داده است [6]. ایشان نشان داد که گسترش آسیب به‌شدت تحت تأثیر تغییرات پروفایل تنش تسلیم است. نیلسن و تورگارد مقاومت در برابر واماندگی نرم را برای یک صفحه آلومینیومی جوش‌کاری‌شده به‌روش اغتشاش اصطکاکی با تجزیه و تحلیل آزمایش کشش بر قطعات بریده‌شده از میان خط جوش مورد مطالعه قرار دادند [7]. آن‌ها به‌دلیل کم بودن مقدار تنش سه محوره از مدل اصلاح‌شده گارسون استفاده کردند که در آن عبارت اضافی در قاعده سیر تکاملی آسیب[11] به آن‌ها اجازه پیش‌بینی رخداد واماندگی در مقادیر صفر و یا منفی از تنش متوسط را می‌داد. آن‌ها دریافتند که این بهینه‌سازی گسترش آسیب اضافی را در جوش‌کاری اغتشاش اصطکاکی فراهم می‌آورد که ممکن است سبب هم‌خوانی با مقادیر آزمایشگاهی شود، اما این بهینه‌سازی پیشنهادی در مجموع به‌شدت به حالت تنش وابسته است و در مواردی که تنش سه محوره بسیار است اثر زیادی بر مدل دارد. با این حال می‌توان استفاده از مدل گارسون در این تحقیق و عدم وابستگی آن به زاویه لود را از ضعف‌های این مطالعه بیان کرد.

سان و همکارانش نیز شبیه‌سازی خواص کششی آلیاژ آلومینیوم و مس را که به‌روش جوش‌کاری اغتشاش اصطکاکی به یکدیگر متصل شده بودند، به‌وسیله مدل آسیب گارسون- تورگارد- نیدلمن پیاده‌سازی کردند [8]. آن‌ها پارامترهای مدل آسیب را به روش معکوس شناسایی کردند و براساس این پارامترها مدل المان محدود خود را برای ناحیه جوش داده شده جهت پیش‌بینی رفتار شکست و خواص کششی ساختند. هانارد و همکارانش فرآیند اغتشاش اصطکاکی را برای شناسایی تأثیر این روش برای اصلاح تخلخل و خردکردن ذرات بین‌فلزی[12] و پخش‌کردن آن‌ها به‌صورت همگن‌تر و بهبود کرنش شکست ماده، بر آلیاژ آلومینیوم سری شش هزار پیاده‌سازی کردند [9]. آزمایش‌های میکروسکوپی انجام‌شده توسط آن‌ها نشان داد که اندازه ذرات بین فلزی به‌وسیله فرآیند اغتشاش اصطکاکی کاهش یافته، حفره‌زایی[13] به تأخیر افتاده و از بین رفتن تخلخل اولیه و همگن‌سازی توزیع ذرات بین فلزی نیز مشاهده شده است. نتایج آزمایش کشش نیز تأیید کرد که این تغییرات در ریزساختار سبب بهبود کرنش شکست شده است. تحقیقات صورت گرفته در زمینه آسیب بیشتر از دیدگاه میکروسکوپی بوده و بیشتر حالت تنش نیز در آن‌ها به‌صورت کامل در نظر گرفته نشده است، همچنین در هیچ یک از تحقیقات گذشته اثر یک پیش‌عملیات مکانیکی بر روند رشد آسیب نرم در ماده بررسی نشده است. در این تحقیق به بررسی اثرات پیش‌عملیات فرآیند اغتشاش اصطکاکی و اثر حالت تنش بر آسیب نرم در آلیاژ آلومینیم 7075-T6 و پیش‌بینی کرنش پلاستیک منجر به شکست در حالت تنش‌های مختلف براساس دو مدل شکست مختلف پرداخته می‌شود. بدین منظور ابتدا با انجام آزمایش‌های تجربی کشش تک‌محوره بر قطعات

[1] Ductile Damage
[2] fracture
[3] Ductile fracture
[4] Equivalent plastic strain
[5] Fracture strain
[6] Cockcroft and Latham ductile fracture criterion
[7] Lode angle
[8] Gurson-Tvergaard-Needleman (GTN)
[9] Stress Traixiality
[10] Friction Stir Process
[11] Damage Evolution Law
[12] Intermetallic
[13] Void Nucleation

تهیه‌شده از ورق آلیاژ آلومینیم 7075-T6 در حالتی که بر ورق پیش‌عملیات فرآیند اغتشاش اصطکاکی انجام پذیرفته بود و همچنین قطعات تهیه‌شده از ورق بدون پیش‌عملیات، به بررسی رفتار پلاستیک ماده و محاسبه کرنش شکست در حالت‌های مختلف تنش پرداخته می‌شود و سپس پارامترهای مادی دو مدل شکست مختلف به‌کمک این آزمایش‌ها برای حالت‌های مختلف با پیش‌عملیات و بدون آن به‌دست می‌آید و سطوح شکست براساس پارامترهای حالت تنش برای پیش‌بینی کرنش پلاستیک معادل منجر به شکست رسم می‌شوند. در نهایت به کمک این دو مدل فرآیند رشد آسیب در این ماده مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد.

2- مدل آسیب

از متغیر عددی آسیب نرم D به‌عنوان یک متغیر داخلی برای بیان تنزل درجه در ماده یا همان آسیب استفاده می‌شود. بازه تغییرات مقدار آسیب $0 \le D \le 1$ است که در واقع مقدار $D = 0$ بدان معنی است که آسیب شروع نشده است، درحالی‌که $D = 1$ نشان‌دهنده آن است که شکست شروع شده است. این پارامتر به‌صورت نسبت کرنش پلاستیک به کرنش واماندگی به صورت رابطه (1) تعریف می‌شود:

$$D = f\left(\frac{\varepsilon_P}{\varepsilon_f}\right) \tag{1}$$

در رابطه بالا ε_p کرنش پلاستیک و ε_f کرنش شکست بر مسیر بارگذاری است که وابسته به پارامترهای حالت تنش یعنی تنش سه محوره و زاویه لود است. این پارامترها به‌ترتیب به‌صورت (3,2) v,hfx تعریف می‌شوند [15-10].

$$\eta = \frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}} \tag{2}$$

$$\theta_L = \tan^{-1}\left(\frac{1}{\sqrt{3}}\frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}\right) \tag{3}$$

در معادلات بالا $\sigma_1 \ge \sigma_2 \ge \sigma_3$ تنش‌های اصلی هستند و $-\pi/6 \le \theta_L \le \pi/6$ است، همچنین σ_m تنش متوسط و σ_{eq} تنش معادل فون میسز هستند. نرخ رابطه (1) به‌صورت رابطه (4) به‌دست می‌آید.

$$\dot{D} = \frac{\partial f\left(\frac{\varepsilon_P}{\varepsilon_f}\right)}{\partial\left(\frac{\varepsilon_P}{\varepsilon_f}\right)}\frac{\dot{\varepsilon}_P}{\varepsilon_f} \tag{4}$$

در این‌جا فرض شده که آسیب نرم به‌دلیل کرنش پلاستیک است؛ بنابراین مشتقات نسبت به η و زاویه θ_L ظاهر نشده‌اند، زیرا $\partial\eta/\partial\varepsilon_P = 0$ و $\partial\theta_L/\partial\varepsilon_P = 0$ است. در معادله بالا می‌توان ε_f را به‌صورت رابطه (5) تعریف کرد.

$$\varepsilon_f = \varepsilon_f(\eta, \theta_L) \tag{5}$$

رابطه بالا نشان‌دهنده وابستگی کرنش شکست به پارامترهای حالت تنش است. در بارگذاری‌های پیچیده نمو آسیب به‌صورت رابطه (6) انتگرال‌گیری می‌شود.

$$D = \int \dot{D}\left(\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_f}\right) d\varepsilon_p \le 1 \tag{6}$$

در ادامه دو مدل آغاز شکست ژو و هاسفورد – کلمب بررسی و مقایسه می‌شوند و ضرایب مادی برای هر یک از مدل‌ها با کمک آزمایش‌های تجربی انجام شده در این تحقیق به‌دست می‌آیند.

2-1- مدل آغاز شکست ژو

ژو یک مدل آسیب پدیدارشناختی را ارائه داد که براساس تعریف کرنش شکست معادل به‌صورت تابعی از فشار p و زاویه لود θ_L بنا شده و به صورت رابطه (7) است [11].

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{f0}\mu_p(p)\mu_\theta(\theta_L) \tag{7}$$

ε_{f0} کرنش شکست مرجع است که از آزمایش کشش در فشار جو به‌دست می‌آید و $\mu_p(p)$ و $\mu_\theta(\theta_L)$ به‌ترتیب نمایان‌گر تابع وابسته به فشار و تابع وابسته به زاویه لود هستند که به‌صورت روابط (9,8) تعریف می‌شوند.

$$\mu_p(p) = 1 - q\ln\left(1 - \frac{P}{P_{lim}}\right) \tag{8}$$

$$\mu_\theta = \gamma + (1-\gamma)\left(\frac{6|\theta_L|}{\pi}\right)^k \tag{9}$$

در روابط بالا P فشار هیدرواستاتیک، P_{lim} حد فشار (که در بالاتر از آن آسیب دیگر اتفاق نمی‌افتد)، γ نسبت بین کرنش شکست در بارگذاری برشی به کرنش شکست در کشش تک محوره است. k و $q > 0$ ضرایب مادی هستند که باید برای هر ماده با انجام آزمایش‌های تجربی به‌دست آورده شوند.

2-2- مدل آغاز شکست هاسفورد-کلمب

مدل تجربی آغاز شکست هاسفورد – کلومب که مستقل از نرخ کرنش است بر این اساس فرمول‌بندی شده است که شکست نرم با شروع برش‌های محلی در مقیاس میکرو به‌وقوع می‌پیوندد [16]. براساس این مدل، شکست در کرنش پلاستیک معادل که آن را با $\bar{\varepsilon}_f$ نشان می‌دهند زمانی اتفاق می‌افتد که شرط رابطه (10) برقرار باشد.

$$\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \frac{d\bar{\varepsilon}_{pl}}{\bar{\varepsilon}_f^{pr}[\eta, \theta_L]} = 1 \tag{10}$$

در رابطه بالا $\bar{\varepsilon}_{pl}$ کرنش پلاستیک معادل و $\bar{\varepsilon}_f^{pr}[\eta, \theta_L]$ کرنش شکست معادل پیش‌بینی وابسته به حالت تنش است. همان‌گونه که دیده می‌شود با مقایسه این رابطه و رابطه (6) می‌توان بیان نمود که زمانی که مقدار پارامتر آسیب D به یک می‌رسد شکست آغاز می‌شود. رابطه (11) عبارت تحلیلی را برای کرنش منتهی به شکست در مدل هاسفورد – کلومب نشان می‌دهد:

$$\bar{\varepsilon}_f^{pr}[\eta, \theta_L] = b(1+c)^{\frac{1}{n}} \left(\left\{\frac{1}{2}\left((f_1 - f_2)^a + (f_2 - f_3)^a + (f_1 - f_3)^a\right)\right\}^{\frac{1}{a}} + c(2\eta + f_1 + f_3)\right) \tag{11}$$

در رابطه بالا پارامتر زاویه لود به توابع مثلثاتی رابطه (12) وابسته است.

$$f_1[\theta_L] = \frac{2}{3}\cos\left[\frac{\pi}{6}(1 - \theta_L)\right],$$
$$f_2[\theta_L] = \frac{2}{3}\cos\left[\frac{\pi}{6}(3 + \theta_L)\right],$$
$$f_3[\theta_L] = -\frac{2}{3}\cos\left[\frac{\pi}{6}(1 + \theta_L)\right] \tag{12}$$

پارامترهای اصلی مادی این مدل a، b و c هستند. توان a اثر پارامتر زاویه لود را کنترل می‌نماید، در حالی‌که ضریب c، کنترل کننده اثر تنش سه محوره بر کرنش منتهی به شکست است. پارامتر b نیز کنترل‌کننده بزرگی کرنش منتهی به شکست است. پارامتر n در رابطه بالا نیز اثر کمی در کالیبره‌کردن مدل برای ماده دارد [17].

3- آزمایش‌های تجربی

3-1- پیش عملیات مکانیکی فرآیند اغتشاش اصطکاکی

برای انجام پیش‌عملیات مکانیکی فرآیند اغتشاش اصطکاکی بر ورق آلیاژ آلومینیوم 7075-T6 با مشخصات آلیاژی مطابق جدول 1 از یک قلم مخصوص مانند طرح نشان داده شده در شکل 1 که از جنس فولاد آلیاژی ساخته شده و سپس آب‌کاری شده است، به‌همراه یک نگهدارنده ورق بر

دستگاه فرز استفاده می‌شود (شکل 2). هندسه ابزار می‌تواند بر عواملی همچون گشتاور، اندازه نیروهای ایجادشده و میزان حرارت تولیدی هنگام فرایند مؤثر باشد. مهم‌ترین پارامترهای هندسی، طول و قطر پین و قطر شانه است. طول پین بستگی به ضخامت لایه‌ای از سطح قطعه کار دارد که قرار است ساختار آن اصلاح شود. قطر شانه معمولاً در محدوده دو تا چهار برابر قطر پین در نظر گرفته می‌شود [18]. در این قلم طول و قطر پین به‌ترتیب برابر 1.5mm و 5mm و قطر شانه برابر 18mm و عمق فرورفتگی قلم در ورق 1.5 mm است، همچنین شیارهای روی بدنه قلم برای خنک‌کاری بهتر قلم به آن اضافه شده است.

این آزمایش‌ها بر ورق به ضخامت 2 میلی‌متر انجام می‌شود و پیش عملیات فرآیند اغتشاش اصطکاکی با شرایط جدول 2 روی ورق مورد اشاره پیاده‌سازی می‌شود (شکل 3).

برای تعیین ضرایب مادی مدل‌ها از ورق‌هایی که فرآیند پیش عملیات فرآیند اغتشاش اصطکاکی بر آن‌ها انجام شده است، باید پس از انجام این فرآیند نمونه‌هایی با مشخصات هندسی خاص که در بخش بعد به آن پرداخته می‌شود، برای انجام آزمایش‌های بعدی استخراج شود. البته نمونه‌های مشابه‌ای از ورق بدون پیش عملیات فرآیند اغتشاش اصطکاکی برای تعیین ضرایب مادی این آلیاژ بدون انجام پیش عملیات مکانیکی بر آن نیز استخراج می‌شود. در شکل 4 محل استخراج قطعات از ورق تحت پیش عملیات فرآیند اغتشاش اصطکاکی و یک نمونه قطعه مستخرج شده به همراه بزرگ‌نمایی ناحیه گلویی شدن قطعه که در ناحیه فرآیند قرار دارد نشان داده شده است.

جدول 1 ترکیب شیمیایی (درصد وزنی) آلیاژ AL-7075-T6

Table 1 Chemical composition (wt%) of AL-7075-T6 alloy

Zn	Mg	Cu	Mn	Fe	Si	Cr	Ti	Others, total	Al
5.6	2.5	1.6	0.3	0.5	0.4	0.23	0.2	0.15	Balance

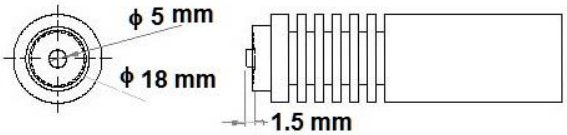

Fig.1 Friction Stir Processing Tool

شکل 1 ابزار فرآیند اغتشاش اصطکاکی

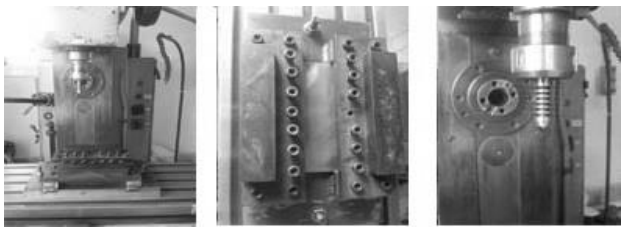

Fig. 2 Friction Stir Process Machine Setup

شکل 2 آماده‌سازی دستگاه برای فرآیند اغتشاش اصطکاکی

جدول 2 شرایط پیش عملیات مکانیکی فرآیند اغتشاش اصطکاکی

Table 2 Condition of Pre-mechanical Friction Stir Process

سرعت پیشروی mm/min	سرعت چرخش قلم rpm	زاویه شیب قلم°
45	450	0

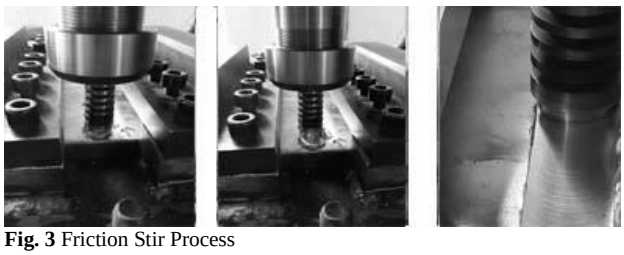

Fig. 3 Friction Stir Process

شکل 3 مراحل انجام فرآیند اغتشاش اصطکاکی

2-3- آزمایش‌های کشش برای تعیین ضرایب مادی مدل‌ها

برای انجام آزمایش‌ها قطعات نمونه‌ای با اشکال هندسی مختلف مانند شکل 5 با مشخصات هندسی مطابق جدول 3، برای ایجاد شرایط مختلف حالت تنش، به‌وسیله برش واترجت استخراج می‌شود. دلیل استفاده از واترجت برای برش قطعات پرهیز از اثرات ماشین‌کاری مانند تنش‌های پسماند و آسیب‌های حاصل از ماشین‌کاری چون اثر شرایط سطحی در لبه‌های برش‌زده بر آغاز شکست در قطعات نمونه است [19]. قطعات مانند آزمایش‌های انجام‌شده در مطالعات گذشته طراحی شد [17] و از سمت چپ به‌ترتیب N3 بدون بریدگی در قسمت اندازه‌گیری، N2 با بریدگی به شعاع R=20mm، N1 با بریدگی به شعاع R=6.67mm و N4 با سوراخ مرکزی به قطر 8mm در قسمت اندازه‌گیری نام‌گذاری می‌شود.

همان‌گونه که پیش‌تر بیان گردید این قطعات علاوه بر استخراج از ورق اولیه ، از ورق‌هایی که بر آن‌ها پیش عملیات فرآیند اغتشاش اصطکاکی انجام گردیده نیز استخراج می‌گردند. آزمایش بر تمامی قطعات با استفاده از دستگاه تست کشش سنتام[1] در دانشگاه آزاد اسلامی مرکز لشت نشا- زیباکنار در نرخ نرخ کرنش پایین برابر با $0.0010s^{-1}$ تا گسیختگی کامل انجام می‌پذیرد و نمودار نیرو-جابه‌جایی به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها در به‌دست آوردن ضرایب مادی مدل‌های بیان شده مورد استفاده قرار می‌گیرند.

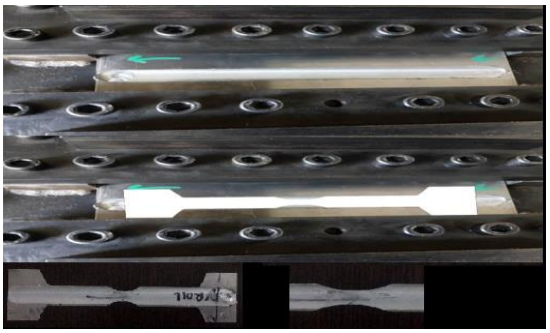

Fig. 4 Location of samples after Friction Stir Process

شکل 4 محل استخراج نمونه‌ها پس از انجام فرآیند اغتشاش اصطکاکی

جدول 3 مشخصات هندسی قطعه و شرایط آزمایش کشش

Table 3 Geometrical specification of the specimens and tensile test conditions

ابعاد قطعه (mm)				سرعت نگه‌دارنده متحرک دستگاه تست کشش mm/min	نرخ کرنش (1/s)
	عرض اولیه		ضخامت اولیه		
	در قسمت نگه‌دارنده‌ها	در قسمت واماندگی			
N1	50	10	2	1.2	0.001
N2	50	10			
N3	51	10			
N4	50	12			

[1] SANTAM

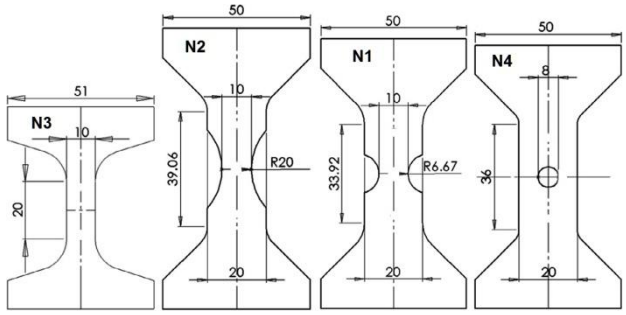

Fig.5 Specimens for experiments

شکل 5 قطعات نمونه طراحی‌شده برای آزمایش کشش

4- بحث و نتایج

در این بخش ابتدا به بررسی نتایج به‌دست آمده از آزمونهای کشش پرداخته می‌شود و سپس با استفاده از نتایج تجربی به‌دست‌آمده ضرایب مادی هرکدام از مدل‌های شکست بیان‌شده استخراج می‌شود و به کمک این ضرایب سطوح پیش بین کرنش شکست برحسب پارامترهای حالت تنش برای ورق اولیه و همچنین ورق تحت پیش عملیات فرآیند اغتشاش اصطکاکی برحسب هر دو مدل آغاز شکست رسم می‌گردد و در نهایت به کمک این پوش‌ها به بررسی آسیب نرم و رشد آن برای این آلیاژ پرداخته می‌شود.

4-1- نتایج آزمون‌های کشش

در شکل‌های 6-9 نمودارهای به‌دست‌آمده برای هریک از هندسه‌های مشخص شده در شکل 5 تحت شرایط بدون پیش عملیات و با پیش‌عملیات مکانیکی فرآیند اغتشاش اصطکاکی با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

همان‌طور که از نمودارها پیداست پیش عملیات فرآیند اغتشاش اصطکاکی سبب کاهش نیرو و افزایش جابه‌جایی در آزمایش کشش در ماده می‌شود؛ بنابراین به خوبی مشهود است در صورتی که برای ماده اولیه‌ای ضرایب یک مدل آغاز شکست مانند مدل‌های بیان‌شده در بخش‌های پیشین به‌دست آمده باشند، پس از انجام پیش عملیاتی مانند فرآیند اغتشاش اصطکاکی نیز ضروری است پارامترهای مادی مدل آغاز شکست دوباره محاسبه شوند تا در هنگام استفاده از این مدل‌ها در محاسباتی چون آسیب نرم و یا شبیه‌سازی‌ها بهترین نتایج حاصل شود.

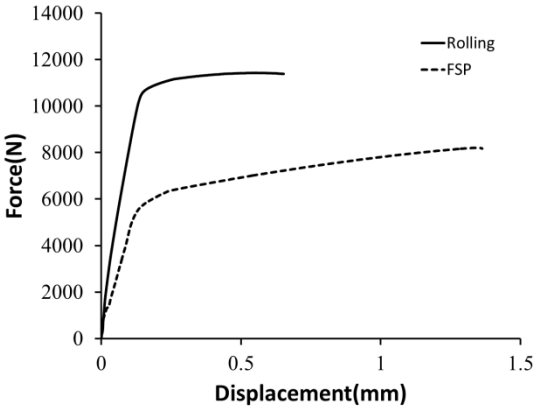

Fig.6 Force-Displacement curve at conditions with and without pre-mechanical Friction Stir Process for sample N1

شکل 6 نمودار نیرو– جابه‌جایی در شرایط بدون و با پیش‌عملیات مکانیکی فرآیند اغتشاش اصطکاکی برای قطعه N1

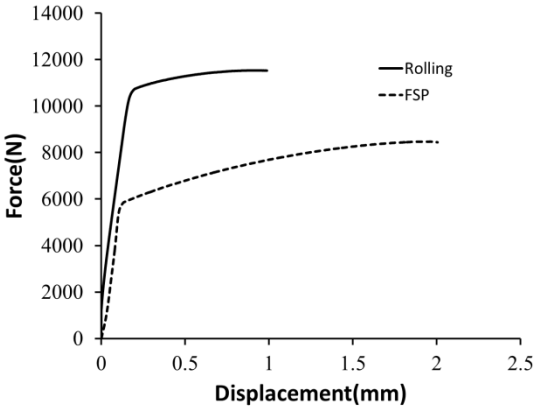

Fig.7 Force-Displacement curve at conditions with and without pre-mechanical Friction Stir Process for sample N2

شکل 7 نمودار نیرو– جابه‌جایی در شرایط بدون و با پیش‌عملیات مکانیکی فرآیند اغتشاش اصطکاکی برای قطعه N2

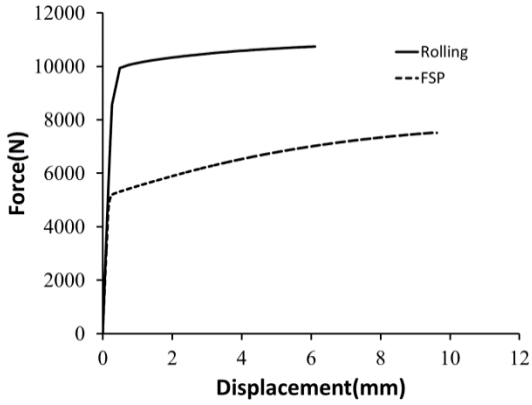

Fig. 8 Force-Displacement curve at conditions with and without pre-mechanical Friction Stir Process for sample N3

شکل 8 نمودار نیرو– جابه‌جایی در شرایط بدون و با پیش‌عملیات مکانیکی فرآیند اغتشاش اصطکاکی برای قطعه N3

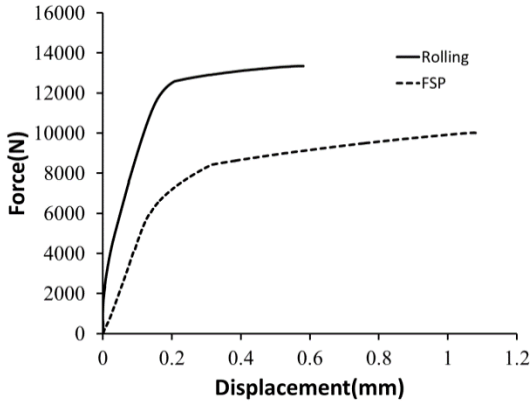

Fig. 9 Force-Displacement curve at conditions with and without pre-mechanical Friction Stir Process for sample N4

شکل 9 نمودار نیرو– جابه‌جایی در شرایط بدون و با پیش‌عملیات مکانیکی فرآیند اغتشاش اصطکاکی برای قطعه N4

4-2- به‌دست‌آوردن ضرایب مادی مدل‌های آغاز شکست

با توجه به این‌که مدل‌های آغاز شکست به حالت تنش وابسته هستند و حالت‌های تنش دارای گستره وسیعی است، نمی‌توان برای تمامی حالت‌های تنش آزمایش‌های تجربی انجام داد؛ بنابراین قطعات و آزمایش‌های مرتبط با

آن‌ها باید طوری طراحی و برنامه‌ریزی گردند که بتوان حالت‌های تنش مختلف را با کمترین تعداد آزمایش‌ها ایجاد کرد. با انجام آزمایش بر قطعات با حالت تنش مختلف می‌توان کرنش شکست مربوط به آن حالت تنش را به‌دست آورد و با قرار دادن این مقادیر در معادله مدل آغاز شکست می‌توان یک دستگاه معادلات جبری غیر خطی ایجاد کرد که با حل آن مقادیر ضرایب مادی هر مدل به‌دست می‌آید. برای به‌دست آوردن حالت تنش هر قطعه یا به عبارتی مقادیر پارامتر زاویه لود و تنش سه محوره در ناحیه شکست باید از روش هیبریدی یعنی ترکیب شبیه‌سازی المان محدود و داده‌های تجربی بهره برد. برای این امر با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس[1] نسخه 6.14 آزمایش کشش قطعات طراحی‌شده شبیه‌سازی می‌شوند و از داده‌های تجربی به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها برای هر قطعه به‌عنوان خواص ورودی ماده استفاده می‌شود. از المان C3D8R برای مش‌بندی نمونه استفاده شده است. برای دقت نتیجه نهایی و استقلال از مش‌بندی، چندین پاسخ از شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گرفت تا منجر به همگرایی نتایج شود و در نهایت المان‌بندی با اندازه مش 0.0005 برگزیده شد. از نتایج شبیه‌سازی انجام‌شده می‌توان پارامترهای حالت تنش هر قطعه را به‌دست آورد. مراحل وردن ضرایب مدل شکست در شکل 10 به صورت یک الگوریتم بیان شده است.

جهت صحت‌سنجی شبیه‌سازی انجام شده می‌توان نمودار نیرو- جابه‌جایی به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی را با نمودار نیرو- جابه‌جایی تجربی همان قطعه مقایسه کرد. به عنوان نمونه در شکل 11 این مقایسه برای قطعه N1 برای حالت بدون پیش‌عملیات مکانیکی صورت می‌پذیرد.

پیش از به‌دست آوردن ضرایب مادی مدل‌های آغاز شکست به بررسی تغییرات پارامترهای حالت تنش برای قطعات مختلف در شرایط بدون پیش عملیات مکانیکی و با پیش عملیات مکانیکی فرآیند اغتشاش اصطکاکی در طی مسیر بارگذاری پرداخته می‌شود.

4-2-1- مسیر بار[2] تا شکست

از عبارت مسیر بار به شکست جهت اشاره به سیر تکاملی میدان مکانیکی و حالت متغیرها در محل آغاز شکست نرم[3] استفاده می‌شود به ویژه زمانی‌که بررسی سیر تکاملی کرنش پلاستیک معادل $\bar{\varepsilon}_p$ به‌عنوان تابعی از تنش سه محوره η و پارامتر زاویه لود θ_L مد نظر است. شکل 12-17 نشان‌دهنده مسیر بار به شکست برحسب کرنش پلاستیک معادل تنش سه محوره و پارامتر زاویه لود برای قطعات N1، N2 و N4 در حالت‌های بدون پیش عملیات و با پیش‌عملیات مکانیکی فرآیند اغتشاش اصطکاکی است. در این شکل‌ها سیر تکاملی کرنش پلاستیک معادل برای هر کدام از قطعات برای ماده آلیاژ آلومینیوم 7075-T6 رسم می‌شود. تنش سه محوره با کاهش پارامتر زاویه لود افزایش می‌یابد و همچنین پیش‌عملیات فرآیند اغتشاش اصطکاکی سبب افزایش کرنش پلاستیک معادل در ماده می‌شود. همان‌طور که از این نمودارها پیداست در قطعات مختلف پارامترهای حالت تنش دارای مقادیر متفاوت و کرنش معادل پلاستیک برای هر حالت تنش نیز متفاوت است و این نشان‌دهنده اهمیت پارامترهای حالت تنش در رفتار این ماده به خصوص در کرنش پلاستیک منجر به شکست است.

4-2-2- ضرایب مادی مدل‌های آغاز شکست و رسم پوش شکست

در هر قطعه با تشکیل و حل دسته معادلات جبری غیرخطی به‌دست‌آمده برای هر یک از مدل‌ها براساس پارامترهای حالت تنش و کرنش شکست به‌دست‌آمده می‌توان ضرایب مادی هر مدل را در حالت بدون پیش عملیات و با پیش‌عملیات مکانیکی فرآیند اغتشاش اصطکاکی به‌دست آورد. یک سطح

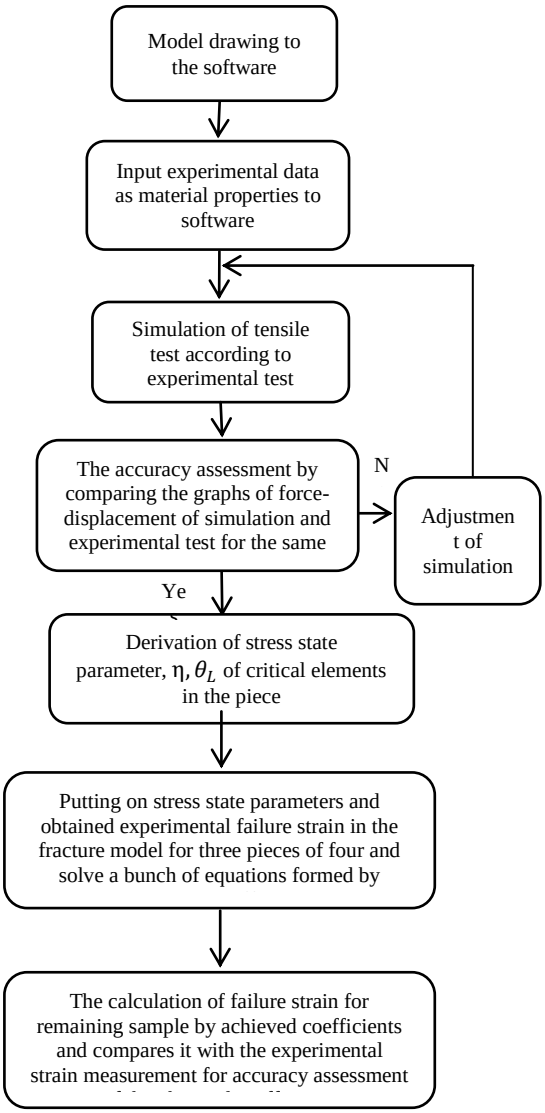

Fig.10 An algorithm to obtain the fracture initiation model coefficients

شکل 10 الگوریتم به‌دست‌آوردن ضرایب مدل آغاز شکست

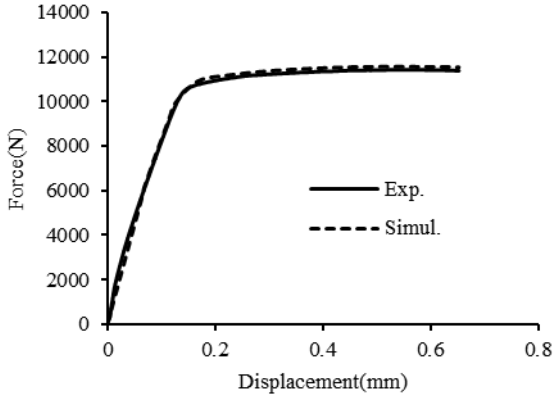

Fig.11 Force-displacement curve compare between simulation and experimental for sample N4

شکل 11 مقایسه بین نمودار نیرو– جابه‌جایی شبیه‌سازی و تجربی برای قطعه N4

[1] ABAQUS 6.14
[2] Loading Paths
[3] Ductile Fracture

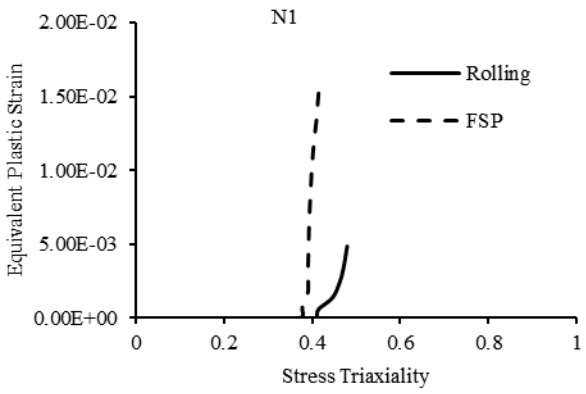

Fig.12 the equivalent plastic strain as a function of the stress triaxiality in Loading paths to fracture for specimens N1

شکل 12 نمودار کرنش پلاستیک معادل برحسب تنش سه محوره در مسیر بار تا شکست برای قطعه N1

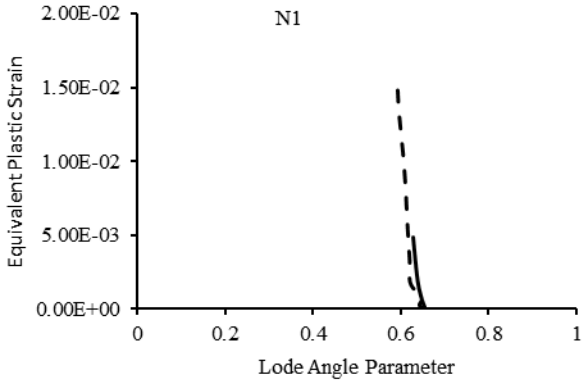

Fig.13 the equivalent plastic strain as a function of the stress Lode angle in Loading paths to fracture for specimens N1

شکل 13 نمودار کرنش پلاستیک معادل برحسب زاویه لود در مسیر بار تا شکست برای قطعه N1

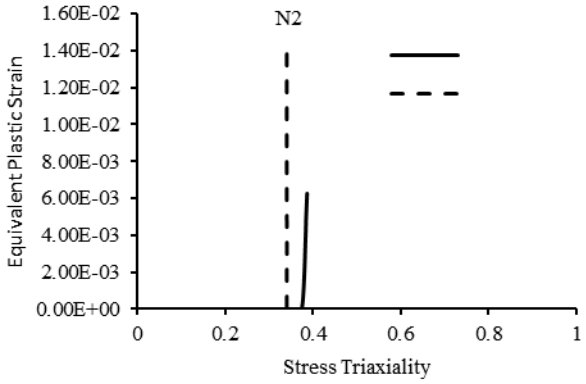

Fig.14 the equivalent plastic strain as a function of the stress triaxiality in Loading paths to fracture for specimens N2

شکل 14 نمودار کرنش پلاستیک معادل برحسب تنش سه محوره در مسیر بار تا شکست برای قطعه N2

شکست پیش‌بین برحسب پارامترهای حالت تنش را با داشتن ضرایب مادی مدل می‌توان رسم کرد، با کمک آن می‌توان در هر حالت تنشی کرنش شکست معادل آن را پیش‌بینی کرد و با کمک آن به بررسی آسیب نرم و

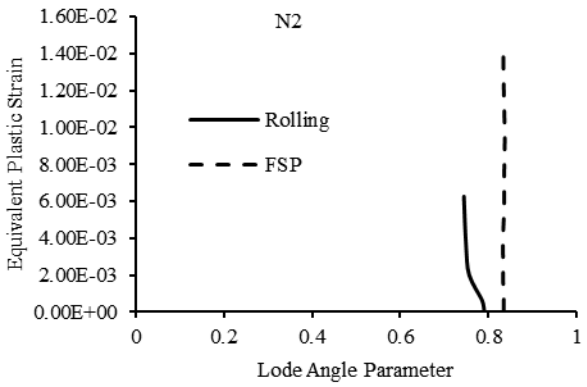

Fig.15 the equivalent plastic strain as a function of the stress Lode angle in Loading paths to fracture for specimens N2

شکل 15 نمودار کرنش پلاستیک معادل برحسب زاویه لود در مسیر بار تا شکست برای قطعه N2

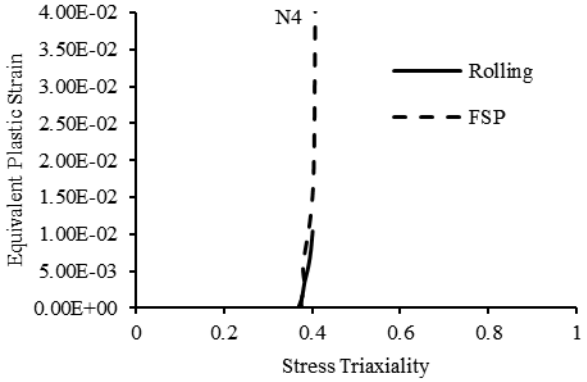

Fig.16 the equivalent plastic strain as a function of the stress triaxiality in Loading paths to fracture for specimens N4

شکل 16 نمودار کرنش پلاستیک معادل برحسب تنش سه‌محوره در مسیر بار تا شکست برای قطعه N4

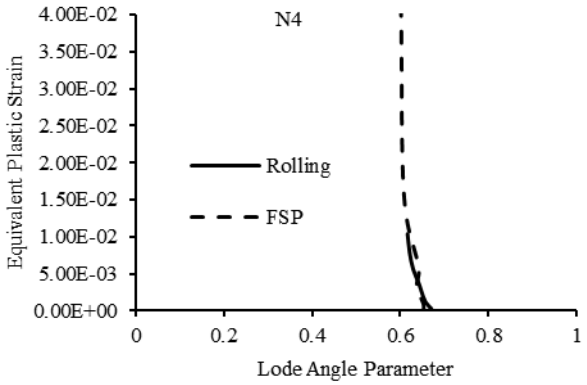

Fig.17 the equivalent plastic strain as a function of the stress Lode angle in Loading paths to fracture for specimens N4

شکل 17 نمودار کرنش پلاستیک معادل برحسب زاویه لود در مسیر بار تا شکست برای قطعه N4

رشد آن پرداخت.

در جدول 4 ضرایب به‌دست‌آمده برای مدل آغاز شکست ژو در حالت‌های بدون پیش عملیات و با پیش عملیات مکانیکی فرآیند اغتشاش اصطکاکی

جدول 4 ضرایب مادی مدل آغاز شکست ژو برای آلیاژ AL-7075-T6

Table 4 Material parameters of Xue fracture initiation model of AL-7075-T6 alloy

ضرایب مادی مدل	q	k	γ
بدون پیش‌عملیات فرآیند اغتشاش اصطکاکی	0.9	2.3	0.2
با پیش‌عملیات فرآیند اغتشاش اصطکاکی	0.5	1.8	0.6

نشان داده می‌شود.

در شکل 18 سطح پیش‌بین کرنش شکست برحسب پارامترهای حالت تنش براساس ضرایب به‌دست‌آمده برای مدل آغاز شکست ژو در حالت‌های بدون پیش عملیات و با پیش‌عملیات مکانیکی فرآیند اغتشاش اصطکاکی نشان داده می‌شود. در جدول 5 ضرایب به‌دست‌آمده برای مدل آغاز شکست هاسفورد- کلمب در حالت‌های بدون پیش عملیات و با پیش عملیات مکانیکی فرآیند اغتشاش اصطکاکی نشان داده می‌شود.

با توجه به تأثیر بسیار اندک پارامتر n مقدار آن در هر دو حالت برابر 0.1 در نظر گرفته می‌شود [17]. در شکل 19 سطح پیش‌بین کرنش شکست برحسب پارامترهای حالت تنش براساس ضرایب به‌دست‌آمده برای مدل آغاز شکست هاسفورد- کلمب در حالت‌های بدون پیش‌عملیات و با پیش‌عملیات مکانیکی فرآیند اغتشاش اصطکاکی نشان داده می‌شود. سطح شکست پیش‌بین نیز کرنش پلاستیک معادل برای یک حالت تنش مشخص همان‌طور که از نتایج تجربی نیز به‌دست‌آمد در زمانی که پیش‌عملیات مکانیکی فرآیند اغتشاش اصطکاکی بر ماده آلومینیوم 7075-T6 انجام می‌پذیرد را بیشتر از حالت بدون پیش عملیات نشان می‌دهد و با توجه به این‌که مطابق رابطه (1) آسیب تابعی از کرنش شکست است، می‌توان نتیجه گرفت که انجام پیش‌عملیات مکانیکی بر آسیب نرم و رشد آن بسیار مؤثر است. در بخش بعد به بررسی آسیب نرم و رشد آن در این ماده پرداخته می‌شود.

جدول 5 ضرایب مادی مدل آغاز شکست هاسفورد- کلمب برای آلیاژ AL-7075-T6

Table 5 Material parameters of Hosford–Coulomb fracture initiation model of AL-7075-T6 alloy

ضرایب مادی مدل	a	b	c
بدون پیش‌عملیات فرآیند اغتشاش اصطکاکی	1.5	0.1	1.7
با پیش‌عملیات فرآیند اغتشاش اصطکاکی	1.8	0.2	1.9

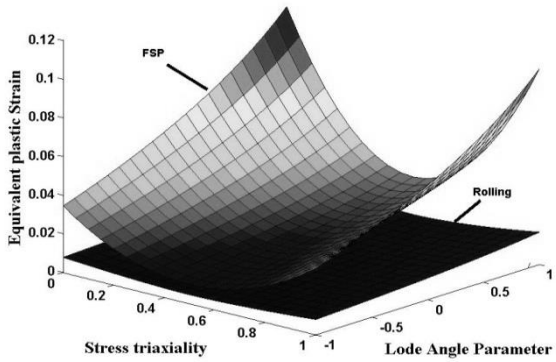

Fig.18 Xue fracture surfaces for pre-mechanical Working and without it in the space of stress triaxiality, Lode angle parameter and equivalent plastic strain

شکل 18 سطح شکست ژو برای شرایط پیش عملیات مکانیکی و بدون آن در فضای تنش سه محوره، زاویه لود و کرنش پلاستیک معادل

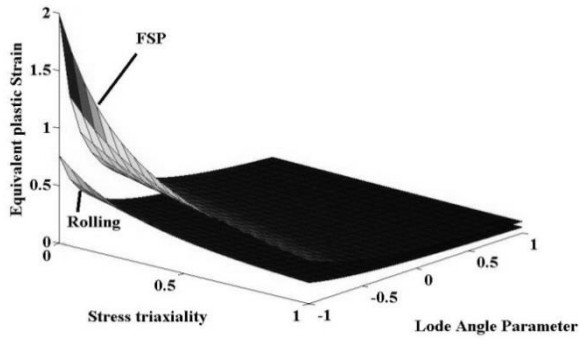

Fig.19 Hosford-Coulomb fracture surfaces for pre-mechanical Working and without it in the space of stress triaxiality, Lode angle parameter and equivalent plastic strain

شکل 19 سطح شکست هاسفورد کلومب برای شرایط پیش‌عملیات مکانیکی و بدون آن در فضای تنش سه محوره، زاویه لود و کرنش پلاستیک معادل

جدول 6 مقایسه مقادیر کرنش شکست پیش‌بینی‌شده از مدل‌های آغاز شکست ژو و هاسفورد- کلومب با مقادیر تجربی به‌دست‌آمده برای چهار نمونه را نشان می‌دهد.

3-4- بررسی آسیب نرم و رشد آن در ماده آلومینیوم 7075-T6

همان‌طور که در رابطه (1) بیان شد آسیب نرم را می‌توان به صورت تابعی از نسبت کرنش پلاستیک به کرنش شکست در همان حالت تنش بیان کرد. یکی از توابع پیشنهادی برای آسیب به صورت رابطه (13) است [4].

$$D = f\left(\frac{\varepsilon_P}{\varepsilon_f}\right) = \left(\frac{\varepsilon_P}{\varepsilon_f}\right)^m \quad (13)$$

که در این رابطه ε_f کرنش شکست وابسته به حالت تنش است که براساس یکی از دو مدل آغاز شکست مطرح شده در همان حالت تنش ماده پیش‌بینی می‌شود و m پارامتر رشد آسیب در ماده است که باید برای شرایط مختلف پیش‌عملیات مکانیکی فرآیند اغتشاش اصطکاکی و بدون پیش‌عملیات مکانیکی برای ماده براساس مدل آغاز شکست به‌کار برده شده به‌دست‌آید. با توجه به تعریف حدود آسیب، مقدار این ضریب باید به‌گونه‌ای به‌دست آید که در هنگام شکست ماده مقدار پارامتر آسیب به 1 نزدیک باشد. جدول 7 ضریب مادی m به‌دست‌آمده برای ماده آلیاژ آلومینیوم 7075-T6 را برای حالت بدون پیش‌عملیات و با پیش‌عملیات مکانیکی فرآیند اغتشاش اصطکاکی برای دو مدل آغاز شکست ژو و هاسفورد- کلومب نشان می‌دهد.

جدول 6 مقایسه کرنش شکست پیش‌بینی و تجربی برای آلیاژ AL-7075-T6

Table 6 Comparing between predicted and experimental Fracture strain of AL-7075-T6 alloy

کرنش شکست برحسب	مدل ژو				مدل هاسفورد- کلومب				آزمایش تجربی			
	N				N				N			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
بدون پیش‌عملیات فرآیند اغتشاش اصطکاکی	0.00437	0.00601	0.0811	0.0099	0.00501	0.00668	0.0901	0.0163	0.00486	0.00625	0.0826	0.0104
با پیش‌عملیات فرآیند اغتشاش اصطکاکی	0.0145	0.0121	0.207	0.139	0.0202	0.0196	0.290	0.183	0.0157	0.013832	0.229	0.158

جدول 7 ضریب رشد آسیب مادی برای آلیاژ AL-7075-T6

Table 7 Material parameters of Damage Evolution of AL-7075-T6 alloy

ضرایب مادی مدل m	مدل ژو	مدل هاسفورد- کلومب
مدل کرنش آغاز شکست برحسب		
بدون پیش‌عملیات فرآیند اغتشاش اصطکاکی	1.8	1.3
با پیش‌عملیات فرآیند اغتشاش اصطکاکی	1.2	1.1

جدول 8 مقادیر پارامتر آسیب D به‌دست‌آمده برای هر قطعه براساس مدل‌های ژو و هاسفورد- کلومب برای ماده آلیاژ آلومینیوم 7075-T6 در شرایط بدون پیش‌عملیات و با پیش‌عملیات مکانیکی فرآیند اغتشاش اصطکاکی را در لحظه آغاز شکست نشان می‌دهد.

براساس نتایج مندرج در جدول 8 مقادیر آسیب که برحسب مدل آغاز شکست ژو به‌دست آمده‌اند مقادیر نزدیک‌تری به مقدار 1 را نشان می‌دهند، هر چند اختلاف مقادیر آسیب به‌دست‌آمده برحسب دو مدل ناچیز است، اما با توجه به این‌که مدل‌های بیان‌شده باید بتوانند کرنش آغاز شکست در حالت‌های تنش دیگری را نیز به غیر از حالت‌های تنش به‌دست‌آمده توسط قطعات آزمایش‌شده پیش‌بینی کنند، می‌توان بیان کرد که مدل ژو دارای قابلیت اعتماد بیشتری برای محاسبه مقدار آسیب انباشته در ماده و در نتیجه پیش‌بینی شکست در ماده است.

همچنین با رسم روند رشد آسیب برحسب کرنش پلاستیک معادل مانند نمودار رسم شده برای قطعه N1 در حالت بدون پیش‌عملیات مطابق شکل 20 دیده می‌شود که شیب مقادیر آسیب به‌دست‌آمده برحسب مدل ژو در ابتدا کم بوده و با نزدیک‌شدن به کرنش شکست این شیب افزایش پیدا می‌کند که این امر با توجه به این‌که با نزدیک شدن به ناحیه ناپایداری و شکست رشد آسیب انباشته در ماده بیشتر و سریع‌تر می‌شود [17] به خوبی هم‌خوانی دارد، اما در مدل هاسفورد- کلومب این شیب تقریباً ثابت است.

5- نتیجه‌گیری

همان‌طور که از نتایج آزمون کشش مشخص است با انجام پیش‌عملیات مکانیکی فرآیند اغتشاش اصطکاکی بر ماده، مقادیر کرنش در آزمایش کشش به مقدار چشم‌گیری افزایش می‌یابد که این موضوع نشان‌دهنده بهبود کرنش شکست ماده نسبت به حالت بدون پیش‌عملیات است، همچنین مقادیر تنش تسلیم و نهایی در ماده نیز کاهش می‌یابد. با توجه به تعریف آسیب نرم و نتایج آزمایشگاهی به‌دست‌آمده می‌توان نتیجه گرفت که رشد آسیب پس از انجام پیش عملیات مکانیکی فرآیند اغتشاش اصطکاکی به دلیل افزایش

جدول 8 مقادیر آسیب برای آلیاژ AL-7075-T6 در لحظه آغاز شکست

Table 7 value of damage at fracture initiation for AL-7075-T6 alloy

آسیب به‌دست‌آمده از مدل شکست	نام قطعه		
	N1	N2	N4
ژو بدون پیش‌عملیات فرآیند اغتشاش اصطکاکی	0.972	0.990	0.982
هاسفورد- کلومب بدون پیش‌عملیات فرآیند اغتشاش اصطکاکی	0.862	0.811	0.811
ژو با پیش‌عملیات فرآیند اغتشاش اصطکاکی	0.980	0.987	0.982
هاسفورد- کلومب با پیش‌عملیات فرآیند اغتشاش اصطکاکی	0.895	0.851	0.881

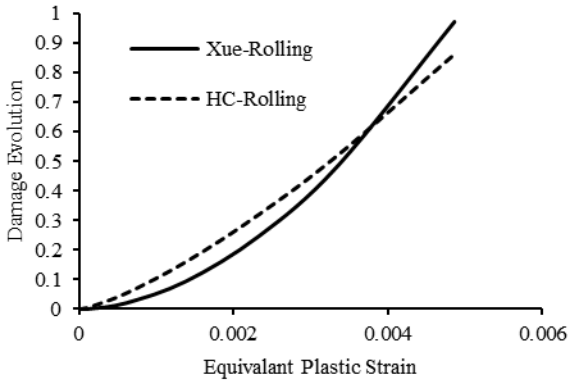

Fig.20 damage evolution versus Equivalent Plastic Strain by Xue and Hosford-Coulomb models for specimen N1.

شکل 20 رشد آسیب برحسب کرنش پلاستیک معادل براساس مدل ژو و مدل هاسفورد-کلومب برای قطعه N1

کرنش پلاستیک در ماده کاهش می‌یابد و یا به عبارتی شکست در ماده در کرنش‌های بزرگ‌تری اتفاق می‌افتد، همچنین با آزمایش بر قطعات مختلف وابستگی آسیب به حالت تنش نشان داده می‌شود که این وابستگی در مدل آغاز کرنش شکست بیان می‌شود. با به‌دست آوردن ضرایب مادی دو مدل آغاز شکست ژو و هاسفورد-کلومب می‌توان مقادیر کرنش شکست را برای تمامی حالت‌های تنش پیش‌بینی کرد. در مقایسه بین دو مدل آغاز شکست ژو و هاسفورد-کلومب دیده می‌شود که مقادیر آسیب به‌دست آمده برحسب مدل آغاز شکست ژو دارای دقت بهتری نسبت به مدل هاسفورد-کلومب است و در نتیجه می‌توان بیان کرد با توجه به مقدار آسیب نرم در هنگام شکست که برابر 1 است می‌توان از مدل آسیب به‌دست‌آمده براساس مدل آغاز شکست ژو با دقت قابل قبولی محل شکست در ماده آلیاژ آلومینیوم 7075-T6 را در حالت تنش‌های مختلف و در شبیه‌سازی‌ها تعیین کرد.

6- مراجع

[1] J. Immarigeon, R. Holt, A. Koul, L. Zhao, W. Wallace, J. Beddoes, Lightweight materials for aircraft applications, *Materials Characterization*, Vol. 35, No. 1, pp. 41-67, 1995.

[2] D.-C. Chen, C.-S. You, F.-Y. Gao, Analysis and experiment of 7075 aluminum alloy tensile test, *Proceedings of The 11th International Conference on Technology of Plasticity*,Nagoya, Japan, October 19-24, 2014.

[3] V. Tvergaard, A. Needleman, Analysis of the cup-cone fracture in a round tensile bar, *Acta metallurgica*, Vol. 32, No. 1, pp. 157-169, 1984.

[4] L. Xue, Constitutive modeling of void shearing effect in ductile fracture of porous materials, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 75, No. 11, pp. 3343-3366, 2008.

[5] K. Nahshon, J. Hutchinson, Modification of the Gurson model for shear failure, *Mechanics-A/Solids*, Vol. 27, No. 1, pp. 1-17, 2008.

[6] K. L. Nielsen, Ductile damage development in friction stir welded aluminum (AA2024) joints, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 75, No. 10, pp. 2795-2811, 2008.

[7] K. L. Nielsen, V. Tvergaard, Effect of a shear modified Gurson model on damage development in a FSW tensile specimen, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 46, No. 3, pp. 587-601, 2009.

[8] G.-Q. Sun, F.-Y. Sun, F.-L. Cao, S.-J. Chen, M. E. Barkey, Numerical simulation of tension properties for al-cu alloy friction stir-welded joints with GTN damage model, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 24, No. 11, pp. 4358-4363, 2015.

[9] F. Hannard, A. Simar, T. Pardoen, Effect of friction stir processing on the damage resistance of 6xxx series aluminium alloys, *International Conference on Processing & Manufacturing of Advanced Materials Processing*, Fabrication, Properties, Applications Thermec 2016.

[10] R. O. Davis, A. P. Selvadurai, *Plasticity and geomechanics*, Second Edittion, pp. 53-58, New York: Cambridge university press, 2005.

[11] L. Xue, *Ductile fracture modeling-theory, experimental investigation and numerical verification*, PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, 2007.

[12] W.-F. Chen, D.-J. Han, *Plasticity for structural engineers*, pp. 46-72 Fort Lauderdale: J. Ross Publishing, 2007.

[13] N. S. Ottosen, M. Ristinmaa, *The mechanics of constitutive modeling*, pp. 27-33, Amesterdam: Elsevier, 2005.
[14] M. Luo, T. Wierzbicki, Numerical failure analysis of a stretch-bending test on dual-phase steel sheets using a phenomenological fracture model, *Solids and Structures*, Vol. 47, No. 22, pp. 3084-3102, 2010.
[15] Y. Bai, T. Wierzbicki, Forming severity concept for predicting sheet necking under complex loading histories, *Mechanical Sciences*, Vol. 50, No. 6, pp. 1012-1022, 2008.
[16] D. Mohr, S. J. Marcadet, Micromechanically-motivated phenomenological Hosford–Coulomb model for predicting ductile fracture initiation at low stress triaxialities, *Solids and Structures*, Vol. 67, pp. 40-55, 2015.
[17] C. C. Roth, D. Mohr, Effect of strain rate on ductile fracture initiation in advanced high strength steel sheets: Experiments and modeling, *Plasticity*, Vol. 56, No. 5, pp. 19-44, 2014.
[18] R. S. Mishra, Z. Ma, Friction stir welding and processing, *Materials Science and Engineering: R: Reports*, Vol. 50, No. 1, pp. 1-78, 2005.
[19] M. Dunand, D. Mohr, Hybrid experimental–numerical analysis of basic ductile fracture experiments for sheet metals, *Solids and Structures*, Vol. 47, No. 9, pp. 1130-1143, 2010.