ماهنامه علمى پژوهشى



مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی اثر پیشعملیات مکانیکی اغتشاش اصطکاکی بر آسیب نرم وابسته به حالت تنش در

مجيد علىطاولى^{1*}، سينا گوهرىراد²، اصغر زاجكانى³، ابوالفضل درويزه⁴

1- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

آلياژ آلومينيوم T6-7075

2- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بین المللی امام خمینی، قزوین

4– استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

«رشت، صندوق پستى 41635-3756 duvoli@guilan.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیدہ
مقاله پژوهشی کامل دریافت: 25 مهر 1395 پذیرش: 26 آذر 1395 ارائه در سایت: 29 دی 1395	در این مقاله اثر پیش عملیات اغتشاش اصطکاکی بر روند تکامل آسیب در آلومینیوم T6-7075 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
<i>کلید واژگان:</i> آسیب نرم پدیدارشناختی پیش عملیات مکانیکی اغتشاش اصطکاکی مدل ژو مدل هاسفورد-کلمب	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 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 آزمایش ها 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 پیش بینی رشد آسیب در این ماده استفاده کرد و سطح شکست به دست آمده 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 Rad¹, Asghar Zajkani², Abolfazl Darvizeh¹

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 ABSTRACT

Original Research Paper Received 16 October 2016 Accepted 16 December 2016

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

Available Online 18 January 2017

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 premechanical 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.

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 در فلزات در بسیاری از كاربردهاى صنعتى افزايش يافته است. آسيب داخلي ميتواند 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 کم در مواد میشود. عبارت واماندگی نرم بهصورت مبهم در کارهای گذشته و بیشتر با دو معنى استفاده شده است. در تحقيقات ميكرومكانيكي بيشتر به عنوان نوع واماندگی در نتیجه حفرهزایی، رشد و بههم آمیختگی 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^۴ برای تشکیل واماندگی در مکانی بحرانی به کار می رود که همچنین می تواند با صرف نظر کردن از قسمت الاستیک در تغییر شکلهای بزرگ آن را کرنش واماندگی[°] نیز نامید. تمایل بسیاری به جای گزینی آلیاژهای آلومینیومی با وزن کم و استحكام بالا بهجاى فولادها براى كاهش آلودگى وجود دارد [1]. سرى 7000 (با تركيب آلياژی Al-Zn-Mg-Cu از ميان ردههای گوناگون آلياژهای 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 بالايي را بهنسبت وزن خود نشان مىدهد و از اينرو به طور گستردهای در صنایع هوافضا مانند ساخت بال ها و نوک دماغه هواپیما به کار می رود، 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 به خصوص در حوزه رفتار پلاستیک تحت شرایط مختلف پرداختهاند. از جمله کارهای اخیر میتوان به تحليل تجربي و شبيهسازي المان محدود صورت گرفته توسط دي 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 م به کار رفته در شبیه سازی المان محدود آن ها دقت بیشتری را نسبت به دیگر معیارهای شکست نشان داد.

معمولاً از دست دادن ظرفیت تحمل بار وابسته به فشار هیدرواستاتیکی در نظر گرفته می شود، در صورتی که حالت تنش براساس دو پارامتر تنش هیدرواستاتیکی و زاویه لود^۷ مشخص می شود. مدل میکرومکانیکی آسیب گارسون- تورگارد- نیدلمن[^] از مدلهای معروف آسیب که در آن پارامتر زاویه لود نادیده گرفته شده است [3]. هنگامی که مدل کردن محلی و واماندگی برای تنشهای سه محوره ٔ کم و تغییر شکلهای ناشی از برش مورد نظر باشد به دلیل از قلم افتادگی پارامتر لو د،پاسخ مناسبی را بهدست نمی آورد 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

Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-03

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^{۱۰} یکی از این پیشعملیاتهای مکانیکی است. نیلسن گسترش آسیب نرم در یک اتصال آلومینیوم به آلومینیوم روش جوش کاری 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 به شدت تحت تأثیر تغییرات پروفایل تنش تسلیم است. نیلسن و تورگارد مقاومت در برابر واماندگی نرم را برای یک صفحه آلومینیومی جوش کاری شده به روش اغتشاش اصطکاکی با تجزیه و تحلیل آزمایش کشش بر قطعات بریده شده 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^{۱۱} 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 می آورد که ممکن است سبب همخوانی با مقادیر آزمایشگاهی شود، اما این بهینهسازی پیشنهادی در مجموع به شدت به حالت تنش وابسته است و در مواردی که تنش سه محوره بسیار است اثر زیادی بر مدل دارد. با این حال می توان 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 جوش کاری اغتشاش اصطکاکی به یکدیگر متصل شده بودند، بەوسىلە مدل آسيب گارسون- تورگارد- نيدلمن پيادەسازى كردند [8]. آنھا 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 اصطكاكي را براي شناسايي تأثير اين روش براي اصلاح تخلخل و خردکردن ذرات بینفلزی^{۱۲} و پخشکردن آنها بهصورت همگنتر و بهبود کرنش شکست ماده، بر آلیاژ آلومینیوم سری شش هزار پیادهسازی کردند [9]. آزمایش های میکروسکوپی انجامشده توسط آن ها نشان داد که اندازه ذرات بین فلزی بهوسیله فرآیند اغتشاش اصطکاکی کاهش یافته، حفرهزایی 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 به صورت کامل در نظر گرفته نشده است، همچنین در هیچ یک از تحقیقات گذشته اثر یک پیش عملیات 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 T6-7075 و پیشبینی کرنش پلاستیک منجر به شکست در حالت تنشهای مختلف براساس دو مدل شکست مختلف پرداخته می شود. بدین منظور ابتدا با انجام آزمایشهای تجربی کشش تکمحوره بر قطعات

¹ Ductile Damage

² fracture ³ Ductile fracture

⁴Equivalent plastic strain

Fracture strain

Cockcroft and Latham ductile fracture criterion

Lode angle

 ⁸ Gurson-Tvergaard-Needleman (GTN)
 ⁹ Stress Traixiality

¹⁰ Friction Stir Process ¹¹ Damage Evolution Law

Intermetallic

¹³ Void Nucleation

تهیهشده از ورق آلیاژ آلومینیم 70-7075 در حالتی که بر ورق پیش عملیات فرآیند اغتشاش اصطکاکی انجام پذیرفته بود و همچنین قطعات تهیهشده از ورق بدون پیش عملیات، به بررسی رفتار پلاستیک ماده و محاسبه کرنش شکست در حالتهای مختلف تنش پرداخته میشود و سپس پارامترهای مادی دو مدل شکست مختلف به کمک این آزمایشها برای حالتهای مختلف با پیش عملیات و بدون آن به دست میآید و سطوح شکست براساس پارامترهای حالت تنش برای پیش بینی 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 می گیرد.

2- مدل آسيب

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

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

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

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

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

در معادلات بالا $\sigma_2 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ تنش های اصلی هستند و $\sigma_{eq} = -\pi/6 \leq \sigma_L \leq \pi/6$ تنش متوسط و $\pi/6 \geq \sigma_{eq}$ تنش معادل فون میسز هستند. نرخ رابطه (1) به صورت رابطه (4) به دست می آید.

$$\dot{D} = \frac{\partial f\left(\frac{\varepsilon_{\rm F}}{\varepsilon_{\rm f}}\right)}{\partial \left(\frac{\varepsilon_{\rm P}}{\varepsilon_{\rm f}}\right)} \frac{\varepsilon_{\rm P}}{\varepsilon_{\rm f}} \tag{4}$$

در این جا فرض شده که آسیب نرم به دلیل کرنش پلاستیک است؛ بنابراین مشتقات نسبت به η و زاویه θ_L ظاهر نشده اند، زیرا $0 = \rho \partial \eta / \partial \varepsilon_P$ و بنابراین مشتقات نسبت به η و زاویه θ_L ظاهر نشده اند، زیرا (5) $\partial \theta_L / \partial \varepsilon_P = 0$ تعریف کرد.

$$\varepsilon_{\rm f} = \varepsilon_{\rm f}(\eta, \theta_{\rm L}) \tag{5}$$

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

$$D = \int \dot{D} \left(\frac{\varepsilon_{\rm p}}{\varepsilon_{\rm f}}\right) d\varepsilon_{\rm p} \le 1 \tag{6}$$

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.

1-2- مدل آغاز شكست ژو

ژو یک مدل آسیب پدیدارشناختی را ارائه داد که براساس تعریف کرنش شکست معادل بهصورت تابعی از فشار q و زاویه لود θL بنا شده و به صورت

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{f0} \mu_p(p) \mu_{\theta}(\theta_L)$$
 (7)
خرنش شکست مرجع است که از آزمایش کشش در فشار جو ε_{f0}

به سال المراجع ال مراجع المراجع ال مراجع المراجع الم مرجع المراجع الم

$$\mu_{\rm p}(p) = 1 - q \ln(1 - \frac{P}{P_{\rm lim}})$$

$$\mu_{\rm \theta} = \gamma + (1 - \gamma) \left(\frac{6|\theta_{\rm L}|}{\pi}\right)^{\rm k}$$
(8)
(9)

در روابط بالا P فشار هیدرواستاتیک، $P_{\rm lim}$ 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 0 > q ضرایب مادی هستند که باید برای هر ماده با انجام آزمایشهای تجربی بهدست آورده شوند.

2-2- مدل آغاز شكست هاسفورد-كلمب

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 می پیوندد [16]. براساس این مدل، شکست در کرنش پلاستیک معادل که آن را با *آق* نشان می دهند زمانی اتفاق می افتد که شرط رابطه (10) برقرار باشد.

$$\int_{0}^{\bar{\varepsilon}_{\rm f}} \frac{d\bar{\varepsilon}_{\rm pl}}{\bar{\varepsilon}_{\rm f}^{\rm pr}[\eta, \theta_{\rm L}]} = 1$$
⁽¹⁰⁾

در رابطه بالا \overline{e}_{pl} کرنش پلاستیک معادل و $[\eta, \theta_L] \overline{e}_f^{pr}$ کرنش شکست معادل پیش بینی وابسته به حالت تنش است. همان گونه که دیده می شود با مقایسه این رابطه و رابطه (6) می توان بیان نمود که زمانی که مقدار پارامتر آسیب D به یک می رسد شکست آغاز می شود. رابطه (11) عبارت تحلیلی را

برای کرنش منتهی به شکست در مدل هاسفورد – کلومب نشان میدهد: $ar{arepsilon}_{c}^{
m pr}[n, heta_{
m l}] = b(1+c)^{rac{1}{n}}$

$$\left(\left\{\frac{1}{2}\left((f_1 - f_2)^a + (f_2 - f_3)^a + (f_1 - f_3)^a\right)\right\}^{\frac{1}{a}} + c(2\eta + f_1 + f_3)\right)$$
(11)

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

$$f_{1}[\theta_{\rm L}] = \frac{2}{3} \cos\left[\frac{\pi}{6}(1-\theta_{\rm L})\right],$$

$$f_{2}[\theta_{\rm L}] = \frac{2}{3} \cos\left[\frac{\pi}{6}(3+\theta_{\rm L})\right],$$

$$f_{3}[\theta_{\rm L}] = -\frac{2}{3} \cos\left[\frac{\pi}{6}(1+\theta_{\rm L})\right]$$
(12)

پارامترهای اصلی مادی این مدل a 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 کالیبره کردن مدل برای ماده دارد [17].

3- آزمایشهای تجربی

1-3- پیش عملیات مکانیکی فرآیند اغتشاش اصطکاکی

برای انجام پیشعملیات مکانیکی فرآیند اغتشاش اصطکاکی بر ورق آلیاژ آلومینیوم TO75-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 می شود (شکل 2). هندسه ابزار می تواند بر عواملی همچون گشتاور، اندازه نیروهای ایجادشده و میزان حرارت تولیدی هنگام فرایند مؤثر باشد. مهم ترین 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 می شود [18]. در این قلم طول و قطر پین به تر تیب برابر 1.5mm و قطر شانه برابر 18mm و عمق فرورفتگی قلم در ورق mm 1.5 است، همچنین شیارهای روی بدنه قلم برای خنک کاری بهتر قلم به آن اضافه شده است.

این آزمایش ها بر ورق به ضخامت 2 میلی متر انجام می شود و پیش عملیات فرآیند اغتشاش اصطکاکی با شرایط جدول 2 روی ورق مورد اشاره پیاده سازی می شود (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

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

Tabl	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

Table 2 Condition	of Fle-mechanical Fliction 3	Sui Flocess
زاويه شيب قلم°	سرعت چرخش قلم rpm	سرعت پیشروی mm/min
0	450	45



Fig. 3 Friction Stir Process

مشابهای از ورق بدون پیش عملیات فرآیند اغتشاش اصطکاکی برای تعیین ضرایب مادی این آلیاژ بدون انجام پیش عملیات مکانیکی بر آن نیز استخراج می شود. 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.

3-2- 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 ماشین کاری مانند تنشهای پسماند و آسیبهای حاصل از ماشین کاری 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 اندازه گیری، N2 با بریدگی به شعاع N1 R=20mm در بریدگی به شعاع R=6.67mm و N4 با سوراخ مرکزی به قطر 8mm در قسمت اندازه گیری نام گذاری میشود.

همان گونه 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 سنتام¹ در دانشگاه آزاد اسلامی مرکز لشت نشا- زیباکنار در نرخ نرخ کرنش پایین برابر با ¹¹ 0.0010 تا گسیختگی کامل انجام می پذیرد و نمودار نیرو-جابه جایی به دست آمده از آزمایش ها در به دست آوردن ضرایب مادی مدل های بیان شده مورد استفاده قرار می گیرند.



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					
÷.;	سرعت نگەدارندە				
کرے کن	متحرك دستگاه			نطعه	ابعاد ق
ترکس (1/s)	تست کشش mm/min			((mm)
	1.2	- 12 -	عرض اوليه		
		- صحامت اوليه	در قسمت	در قسمت	•
0.001			واماندگی	نگەدارندەھا	
0.001	1.2		10	50	N1
		2	10	50	N2
		2	10	51	N3
			12	50	N4

¹ SANTAM

368

شكل 3 مراحل انجام فرآيند اغتشاش اصطكاكي



Fig.5 Specimens for experiments

شکل 5 قطعات نمونه طراحی شده برای آزمایش کشش

4- بحث و نتايج

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 می گردد و در نهایت به کمک این پوشها به بررسی آسیب نرم و رشد آن برای این آلیاژ پرداخته میشود.

1-4- 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.

همان طور که از نمودارها پیداست پیش عملیات فرآیند اغتشاش اصطکاکی سبب کاهش نیرو و افزایش جابه جایی در آزمایش کشش در ماده می شود؛ بنابراین به خوبی مشهود است در صورتی که برای ماده اولیه ای ضرایب یک مدل آغاز شکست مانند مدل های بیان شده در بخش های پیشین به دست 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 مدل ها در محاسباتی چون آسیب نرم و یا شبیه سازی ها بهترین نتایج حاصل شود.



Fig.6 Force-Displacement curve at conditions with and without premechanical 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 premechanical 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 premechanical 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 premechanical Friction Stir Process for sample N4

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

2-4- بەدست آوردن ضرایب مادی مدل های آغاز شکست

با توجه به این که مدل های آغاز شکست به حالت تنش وابسته هستند و حالتهای تنش دارای گستره وسیعی است، نمیتوان برای تمامی حالتهای تنش آزمایش های تجربی انجام داد؛ بنابراین قطعات و آزمایش های مرتبط با

369

آنها باید طوری طراحی و برنامهریزی گردند که بتوان حالتهای تنش مختلف را با كمترين تعداد آزمايشها ايجاد كرد. با انجام آزمايش بر قطعات با حالت تنش مختلف مى توان كرنش شكست مربوط به آن حالت تنش را بهدست آورد و با قرار دادن این مقادیر در معادله مدل آغاز شکست می توان 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. براى اين امر با استفاده از نرمافزار المان محدود آباكوس' نسخه 6.14 آزمایش کشش قطعات طراحی شده شبیه سازی می شوند و از داده های تجربی بهدستآمده از آزمایشها برای هر قطعه بهعنوان خواص ورودی ماده استفاده می شود. از المان C3D8R برای مش بندی نمونه استفاده شده است. برای دقت نتیجه نهایی و استقلال از مش بندی، چندین پاسخ از شبیه سازی مورد بررسی قرار گرفت تا منجر به همگرایی نتایج شود و در نهایت المان بندی با اندازه مش 0.0005 برگزیده شد. از نتایج شبیهسازی انجامشده می توان پارامترهای حالت تنش هر قطعه را بهدست آورد. مراحل وردن ضرایب مدل شكست در شكل 10 به صورت يك الگوريتم بيان 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 می پذیرد.

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.

1-2-4- مسير بار^۲ تا شکست

از عبارت مسیر بار به شکست جهت اشاره به سیر تکاملی میدان مکانیکی و حالت متغیرها در محل آغاز شکست نرم⁷ استفاده می شود به ویژه زمانی که بررسی سیر تکاملی کرنش پلاستیک معادل \overline{r} بهعنوان تابعی از تنش سه محوره η و پارامتر زاویه لود. θ_L مد نظر است. شکل 12–17 نشان دهنده مسیر بار به شکست برحسب کرنش پلاستیک معادل تنش سه محوره و پارامتر زاویه لود برای قطعات N1، N1 و N4 در حالتهای بدون پیش عملیات و با پیش عملیات مکانیکی فرآیند اغتشاش اصطکاکی است. در این شکلها سیر آلومینیوم 76–707 رسم می شود. تنش سه محوره با کاهش پارامتر زاویه لود افزایش می یابد و همچنین پیش عملیات فرآیند اغتشاش اصطکاکی سبب افزایش کرنش پلاستیک معادل در ماده می شود. همان طور که از این نمودارها و افزایش می یابد و همچنین پیش عملیات فرآیند اغتشاش اصطکاکی سبب نمودارها نظار معاد می شود. تنش سه محوره با کاهش پارامتر زاویه نمود می نظار مقادی معادل در ماده می شود. همان طور که از این نمودارها نمودارها در ماده می شود. همان طور که از این نمودارها در کان پیداست در قطعات مختلف پارامترهای حالت تنش دارای مقادیر متفاوت و کرنش معادل پلاستیک برای هر حالت تنش در رفتار این ماده به خصوص در کرنش ملاستیک منجر به شکست است.

4-2-2- ضرایب مادی مدل های آغاز شکست و رسم پوش شکست در هر قطعه با تشکیل و حل دسته معادلات جبری غیرخطی بهدستآمده

ABAQUS 6.14

برای هر یک از مدلها براساس پارامترهای حالت تنش و کرنش شکست

بهدست آمده می توان ضرایب مادی هر مدل را در حالت بدون پیش عملیات و







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

² Loading Paths ³ Ductile Fracture



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



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



 $\label{eq:Fig.14} Fig.14 \mbox{ the equivalent plastic strain as a function of the stress triaxiality in Loading paths to fracture for specimens N2$

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

شکست پیش بین 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 پیش بینی کرد و با کمک آن به بررسی آسیب نرم و

uivalent plastic 0.5 Rolling 0.5 -0.5 1 -1 Stress triaxiality Lode Angle Parameter

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 پیش بینی شده از مدل های آغاز شکست ژو و هاسفورد- کلومب با مقادیر تجربی بهدست آمده برای چهار نمونه را نشان میدهد.

3-4- بررسى آسيب نرم و رشد آن در ماده آلومينيوم 7075-T6

همان طور که در رابطه (1) بیان شد آسیب نرم را می توان به صورت تابعی از نسبت کرنش پلاستیک به کرنش شکست در همان حالت تنش بیان کرد. کې از توابع پېشنهادي داي آسيب په صورت رابطه (13) است [4].

$$D = f\left(\frac{\varepsilon_{\rm P}}{\varepsilon_{\rm f}}\right) = \left(\frac{\varepsilon_{\rm P}}{\varepsilon_{\rm f}}\right)^{\rm m}$$
(13)

که در این رابطه £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 پیش عملیات مکانیکی برای ماده براساس مدل آغاز شکست به کار برده شده بهدستآید. با توجه به تعریف حدود آسیب، مقدار این ضریب باید به گونهای بهدست آید که در هنگام شکست ماده مقدار پارامتر آسیب به 1 نزدیک باشد. جدول 7 ضريب مادى m بەدست آمدە براى مادە آلياژ آلومينيوم 76-7075 را برای حالت بدون پیش عملیات و با پیش عملیات 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

ى	تجرب	ليش	آزه	-	سفورد مب	دل ها، کلو،	مد		5	مدل ژو		كرنش شكست
	Ν				1	N				Ν		برحسب
4	3	2	1	4	3	2	1	4	3	2	1	
0.0104	0.0826	0.00625	0.00486	0.0163	0.0901	0.00668	0.00501	0.0099	0.0811	0.00601	0.00437	بدون پیشعملیات فرآیند اغتشاش اصطکاکی
0.158	0.229	0.013832	0.0157	0.183	0.290	0.0196	0.0202	0.139	0.207	0.0121	0.0145	با پیشعملیات فرآیند اغتشاش اصطکاکی

جدول 4 ضرايب مادى مدل آغاز شكست ژو براى آلياژ AL-7075-T6 Table 4 Material parameters of Xue fracture initiation model of AL-7075-T6 allov

		o unoj	1010 1
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 می شود.

در شكل 18 سطح پيش بين كرنش شكست برحسب پارامترهاى حالت تنش براساس ضرایب بهدست آمده برای مدل آغاز شکست ژو در حالتهای بدون پیش عملیات و با پیشعملیات مکانیکی فرآیند اغتشاش اصطکاکی نشان داده می شود. در جدول 5 ضرایب به دست آمده 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 تأثير بسيار اندک يارامتر n مقدار آن در هر دو حالت برابر 0.1 در نظر گرفته می شود [17]. در شکل 19 سطح پیش بین کرنش شکست برحسب پارامترهای حالت تنش براساس ضرایب بهدست آمده برای مدل آغاز شکست هاسفورد- کلمب در حالتهای بدون پیش عملیات و با پیش عملیات مكانيكي فرآيند اغتشاش اصطكاكي نشان داده مي شود. سطح شكست پیشبین نیز کرنش پلاستیک معادل برای یک حالت تنش مشخص همان طور که از نتایج تجربی نیز بهدست آمد در زمانی که پیش عملیات مکانیکی فرآیند اغتشاش اصطكاكي بر ماده آلومينيوم T6-7075 انجام مي پذيرد را بيشتر از حالت بدون پیش عملیات نشان می دهد و با توجه به این که 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 می شود.

جدول 5 ضرايب مادى مدل آغاز شكست هاسفورد- كلمب براى آلياژ AL-7075-T6 Table 5 Material parameters of Hosford-Coulomb fracture initiation model of AL-7075-T6 alloy

ضرایب مادی مدل	а	b	С
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

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

Table

ندول 7 ضریب رشد آسیب مادی برای آلیاژ AL-7075-T6
7 Material parameters of Damage Evolution of AL-7075-T6

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

جدول 8 مقادیر پارامتر آسیب D بهدستآمده برای هر قطعه براساس مدلهای ژو و هاسفورد- کلومب برای ماده آلیاژ آلومینیوم T075-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 می دهند، هر چند اختلاف مقادیر آسیب بهدست آمده برحسب دو مدل ناچیز است، اما با توجه به این که مدل های بیان شده باید بتوانند کرنش آغاز شکست در حالت های تنش دیگری را نیز به غیر از حالت های تنش بهدست آمده توسط قطعات آزمایش شده پیش بینی کنند، می توان بیان کرد که مدل ژو دارای قابلیت اعتماد بیشتری برای محاسبه مقدار آسیب انباشته در ماده و در نتیجه پیش بینی شکست در ماده است.

همچنین با رسم روند رشد آسیب برحسب کرنش پلاستیک معادل مانند نمودار رسم شده برای قطعه N1 در حالت بدون پیش عملیات مطابق شکل 20 دیده می شود که شیب مقادیر آسیب به دست آمده برحسب مدل ژو در ابتدا کم بوده و با نزدیک شدن به کرنش شکست این شیب افزایش پیدا می کند که این امر با توجه به این که با نزدیک شدن به ناحیه ناپایداری و شکست رشد آسیب انباشته در ماده بیشتر و سریعتر می شود [17] به خوبی هم خوانی دارد، اما در مدل هاسفورد-کلومب این شیب تقریباً ثابت است.

5- نتیجه گیری

همانطور که از نتایج آزمون کشش مشخص است با انجام پیشعملیات مکانیکی فرآیند اغتشاش اصطکاکی بر ماده، مقادیر کرنش در آزمایش کشش به مقدار چشم گیری افزایش می ابد که این موضوع نشان دهنده بهبود کرنش شکست ماده نسبت به حالت بدون پیش عملیات است، همچنین مقادیر تنش تسلیم و نهایی در ماده نیز کاهش می بابد. با توجه به تعریف آسیب نرم و نتایچ آزمایشگاهی به دست آمده می توان 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 <u>at</u> fracture initiation for AL-7075-T6 alloy

	نام قطعه		آسب بعدت آمدما: مدار شکست
N4	N2	N1	
0.982	0.990	0.972	ژو بـدون پـیشعملیـات فرآینـد اغتشـاش اصطکاکی
0.811	0.811	0.862	هاسـفورد- کلومـب بـدون پـیشعملیـات فرآیند اغتشاش اصطکاکی
0.982	0.987	0.980	ژو بـــا پـــیشعملیــات فرآینـــد اغتشــاش اصطکاکی
0.881	0.851	0.895	هاسفورد- کلومب با پـیشعملیـات فرآینـد اغتشاش اصطکاکی



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 به دست 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 به دست آمده بر حسب 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 به دست آمده براساس مدل آغاز شکست ژو با دقت قابل قبولی محل شکست در ماده آلیاژ آلومینیوم 6T-570 را در حالت تنشهای مختلف و در شبیه سازیها تعیین کرد.

6- مراجع

- 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
- [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.

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 [17] C. C. Roth, D. Mohr, Effect sheats: 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.
- [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 [14] M. Edo, T. Wierzbicki, runnerka influence analysis of a succer-boding 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. 1020-2020.
- 1012-1022, 2008.
- [16] D. Mohr, S. J. Marcadet, Micromechanically-motivated phenomenological