



Article Info

Received: 2020-9-20
Accepted: 2021-5-21

Keywords

Ductile fracture, critical damage, Ti-6Al-4V, metal forming

How to Cite this article

S. Javid Mirahmadi, Mohsen Hamedi and Maedeh sadat Zoei, "Investigating the Effect of Equiaxed and Lamellar Microstructure on Critical Damage of Ti-6Al-4V in Isothermal Compression of Grooved Double-Cone Specimens", *Journal of Space Science, Technology and Applications*, vol 1 (1), p.: 81-91, 2021.

Investigating the Effect of Equiaxed and Lamellar Microstructure on Critical Damage of Ti-6Al-4V in Isothermal Compression of Grooved Double-Cone Specimens

S. Javid Mirahmadi^{*1}, Mohsen Hamedi² and Maedeh sadat Zoei³

1. Institute of Materials and Energy, Iranian Space Research Center, Isfahan, Iran, sj.mirahmadi@isrc.ac.ir
 2. Faculty of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, mhamedi@ut.ac.ir
 3. Institute of Materials and Energy, Iranian Space Research Center, Isfahan, Iran, m.zoei@isrc.ac.ir
- *Corresponding author

Abstract

Ti-6Al-4V is one of the most common materials in the aerospace industry. For example, satellite fuel tanks are made of this alloy. Among manufacturing processes, forming processes is one of the most widely used areas in the manufacture of Ti-6Al-4V components. Due to the importance of determining the allowable deformation limit in the successful design of the Ti-6Al-4V forming process, in this paper, the amount of critical damage was studied. For this purpose, parts with double-cone geometry with grooves on the maximum diameter with two initial microstructure, lamellar and equiaxed, were fabricated and subjected to hot compression testing. The results showed that the initial equiaxed microstructure provides good accumulated damage tolerance. Up to 2.38, 2.67, and 5.89 accumulated damage values, according to Cockcroft-Latham, Brozo, and McClintock criteria, respectively, no crack was observed on the samples. However, with an initial lamellar microstructure, the damage tolerance was significantly reduced. The critical damage value based on Cockcroft-Latham, Brozzo and McClintock criteria was 1.05 ± 0.02 , 1.03 ± 0.02 , and 2.56 ± 0.05 , respectively.



بررسی تاثیر ریزساختار هم‌محور و لایه‌ای بر آسیب بحرانی آلیاژ Ti-6Al-4V در فرآیند فشار همدمای نمونه‌های دو مخروطی شیاردار

سید جاوید میراحمدی^{۱*}، محسن حامدی^۲، مائده السادات ضوئی^۳

۱. * پژوهشکده مواد و انرژی، پژوهشگاه فضایی ایران، sj.mirahmadi@isrc.ac.ir (نویسنده مسئول)

۲. دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، mhamed@ut.ac.ir

۳. پژوهشکده مواد و انرژی، پژوهشگاه فضایی ایران، m.zoei@isrc.ac.ir

دو فصلنامه
علوم، فناوری و
کاربردهای فضایی

سال اول، شماره ۱، صفحه ۹۱-۸۱
بهار و تابستان ۱۴۰۰

Available in:
Journal.isrc.ac.ir/article_137523.html

چکیده

آلیاژ Ti-6Al-4V یکی از پرکاربردترین مواد در صنایع هوافضا است. به عنوان نمونه، مخزن سوخت حامل‌های ماهواره از جنس آلیاژ مذکور ساخته می‌شوند. در میان فرایندهای ساخت، فرایندهای شکل‌دهی یکی از حوزه‌های پرکاربرد در ساخت قطعات از جنس Ti-6Al-4V است. با توجه به اهمیت تعیین حد مجاز تغییر شکل در طراحی موفق فرایند شکل‌دهی قطعات از جنس آلیاژ Ti-6Al-4V، در این مقاله به مطالعه مقدار آسیب بحرانی پرداخته شد. بدین منظور قطعاتی با هندسه دو مخروطی دارای شیار بر روی قطر بیشینه با دو ریزساختار اولیه هم‌محور و لایه‌ای ساخته شدند و تحت آزمون فشار داغ قرار گرفتند. نتایج بررسی نشان داد که ریزساختار اولیه هم‌محور به خوبی تحمل آسیب انباشته را فراهم می‌کند و تا آسیب ۲/۳۸، ۲/۶۷ و ۵/۸۹ به ترتیب بر اساس معیارهای کاک‌کرافت-لاتام، بروز و مک‌کلینتوک ترکی بر روی قطعات مشاهده نشد. اما در صورتی که نمونه اولیه دارای ریزساختار لایه‌ای باشد، حد تحمل آسیب به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد و آسیب بحرانی از تطابق نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود با آزمون تجربی به ترتیب بر اساس معیارهای کاک‌کرافت-لاتام، بروز و مک‌کلینتوک برابر $۱/۰۵ \pm ۰/۰۲$ ، $۱/۰۳ \pm ۰/۰۲$ و $۲/۵۶ \pm ۰/۰۵$ به دست آمد.

تاریخچه داوری

دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۳۰

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۳۱

واژه‌های کلیدی

شکست نرم، آسیب بحرانی، آلیاژ
تیتانیوم، تغییر شکل

نحوه استناد به این مقاله

سید جاوید میراحمدی، محسن حامدی، مائده السادات ضوئی، "بررسی تاثیر ریزساختار هم‌محور و لایه‌ای بر آسیب بحرانی آلیاژ Ti-6Al-4V در فرآیند فشار همدمای نمونه‌های دو مخروطی شیاردار"، دو فصلنامه علوم، فناوری و کاربردهای فضایی، جلد اول، شماره اول، صفحات ۸۱-۹۱، ۱۴۰۰.

۱- مقدمه

همکاران با به کارگیری مدل آسیب محیط پیوسته نرم ایزوتروپ در فرایند آپست به بررسی ایجاد و رشد ترک با استفاده از روش اجزای محدود پرداختند. مدل ارائه شده توسط آنها قادر به پیش‌بینی ایجاد ترک در مدل از پیش ترک خورده بود [۵]. کوموری^۷ یک کد کامپیوتری توسعه داد که با استفاده از روش اجزای محدود بتوان به مطالعه رشد ترک در شکست نرم پردازد. او برای جداسازی نودها در حین رشد ترک، راستای بیشترین تنش اصلی را در نظر گرفت. البته با توجه به معیار شکست انتخابی، نتایج او با آزمایش‌ها سازگاری نداشت [۶]. سانونی^۸ با استفاده از نرم‌افزار تجاری اجزای محدود آباکوس و به کارگیری کوپل سخت‌شوندگی ایزوتروپ و سینماتیکی با آسیب نرم ایزوتروپ به شبیه‌سازی فرایندهای مختلف شکل‌دهی پرداخت تا قابلیت روش اجزای محدود برای پیش‌بینی شروع ترک را نشان دهد. نتایج او نشان داد که روش اجزای محدود به خوبی قابلیت شبیه‌سازی شروع ترک را دارد [۷]. ژان^۹ و همکاران با به کارگیری دو معیار آسیب لمایتر^{۱۰} و کاک‌کرافت-لاتام در مدل‌سازی اجزای محدود به بررسی قابلیت آنها در پیش‌بینی زمان، موقعیت و توزیع آسیب در خم‌کاری لوله پرداختند. نتایج آنها نشان داد که مدل لمایتر قابلیت بهتری در تشخیص موقعیت و توزیع آسیب دارد [۸]. چوی^{۱۱} و همکاران به بررسی قابلیت معیار کاک‌کرافت-لاتام در پیش‌بینی ایجاد و گسترش ترک چورون^{۱۲} در قطعه اکستروژن شده پرداختند. با استفاده از نتایج به دست آمده نمودار فرایند را به گونه‌ای ارائه کردند که مانع از ایجاد ترک‌های مذکور شوند [۹]. ژو^{۱۳} و همکاران با استفاده از آزمون فشار و تکنیک عکاسی با سرعت بالا و به کارگیری مدل‌سازی اجزای محدود یک مدل برای پیش‌بینی ارتباط بین شکست نرم و تنش، کرنش، نرخ کرنش و دمای تغییرشکل آلیاژ Ti40 ارائه نمودند. نتایج آنها نشان داد که پارامتر آسیب بحرانی با لگاریتم پارامتر زنر-هولومون^{۱۴} دارای ارتباط خطی معکوس هستند [۱۰]. لو و هوه^{۱۵} با استفاده از ترکیب شبیه‌سازی و آزمون تجربی و به کارگیری چهار نوع نمونه در آزمون کشش، کرنش معادل در کشش تک محوری، کشش کرنش صفحه‌ای را اندازه‌گیری نمودند. از این مقادیر برای تعیین مقادیر ثابت در معیار شکست

امروزه آلیاژهای تیتانیوم دارای کاربردهای فراوانی در صنایع مختلف هستند. با این وجود به دلیل استحکام ویژه قابل توجه این آلیاژها، بخش عمده‌ای از کاربرد آنها در صنایع هوافضا است. در میان آلیاژهای تیتانیوم، Ti-6Al-4V پرکاربردترین آلیاژ است. به عنوان نمونه، مخزن سوخت حامل‌های ماهواره از جنس آلیاژ مذکور ساخته می‌شوند. در فرایند ساخت اغلب قطعات از جنس آلیاژ Ti-6Al-4V، فرایندهای شکل‌دهی حضور دارند. در طراحی این فرایندها، اطمینان از قطعه سالم و عاری از عیب و ترک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با تغییر فرایندهای ترمومکانیکی در شکل‌دهی این آلیاژ، علاوه بر اینکه گستره وسیعی از ریزساختارها و خواص مکانیکی قابل دست‌یابی است، میزان کارپذیری نیز تغییر می‌کند.

با توجه به اهمیت جلوگیری از ایجاد شکست در قطعه، تاکنون مطالعات زیادی برای پیش‌بینی شکست انجام شده است. همبلی و بدیه لوت^۱ برای پیش‌بینی ایجاد و تغییرات آسیب در فرآیند اکستروژن، از مدل‌سازی اجزای محدود استفاده نمودند. آنها مقدار آسیب بحرانی را با استفاده از آزمون کشش تعیین کردند. نتایج بررسی فرایند اکستروژن نشان داد که احتمال ایجاد ترک بر روی سطح خارجی قطعه وجود دارد که با نتایج تجربی سازگار بود [۱]. دومانتی^۲ و همکاران با به کارگیری مدل آسیب کاک‌کرافت-لاتام^۳ در شبیه‌سازی فرایند اکستروژن به بررسی تاثیر پارامترهایی چون زاویه قالب و موقعیت شعاعی بر مقدار پارامتر آسیب پرداختند. نتایج آنها نشان داد، با افزایش زاویه قالب، میزان پارامتر آسیب و احتمال ایجاد ترک در قطعه افزایش می‌یابد [۲]. همبلی و رزکا^۴ با استفاده از روش معکوس به بررسی مقدار آسیب بحرانی مدل‌های مختلف آسیب در فرایند ورق‌کاری و معتبر بودن مدل‌های مختلف برای پیش‌بینی برش پرداختند. نتایج آنها نشان دهنده نامعتبر بودن تعدادی از مدل‌های آسیب بود [۳]. رگب^۵ با استفاده از راه‌حل نیمه تجربی برای تنش در ترکیب با معیار تسلیم در حین آپست نمونه استوانه‌ای به پیش‌بینی منحنی حد شکست فرایند پرداخت [۴]. چونگ^۶ و

9 Zhan

10 Lemaitre

11 Choi

12 Chevron Crack

13 Zhu

14 Zener-Hollomon

15 Lou and Huh

1 Hamblin and Badie-Levet

2 Domanti

3 Cockcroft-Latham

4 Reszka

5 Ragab

6 Chung

7 Komori

8 Saanouni

علاوه بر آن، پاتر و همکاران به بررسی قابلیت پیش‌بینی معیارهای شکست مختلف پرداختند. در میان معیارهای مختلف آنها معیارهای اوپان^۹، آرگون^{۱۰} و همکاران، فرودنتال^{۱۱} و بروزو^{۱۲} و همکاران را برای فرایند نورد گوه‌ای عبوری^{۱۳} پیشنهاد نمودند [۱۹].

با توجه به اهمیت پیش‌بینی احتمال ایجاد ترک در مرحله طراحی فرایند شکل‌دهی، مطالعات گسترده‌ای در این حوزه انجام شده است. معیارهای متنوعی برای پیش‌بینی آغاز ترک ارائه شده است و قابلیت پیش‌بینی آنها برای حالت‌های مختلف مورد ارزیابی و گاهی مقایسه قرار گرفته است. با این وجود در مطالعات صورت گرفته توجه به ریزساختار اولیه ماده و تاثیر آن بر آغاز شکست مغفول مانده است. این مورد در رابطه با آلیاژ دو فاز Ti-6Al-4V تاثیر قابل توجهی دارد. به همین دلیل در این مقاله به تاثیر ریزساختار اولیه بر میزان آسیب بحرانی در مدل‌های مختلف پیش‌بینی شکست در فرایند تغییر شکل همدمای Ti-6Al-4V پرداخته می‌شود.

۲- معیارهای شکست نرم

شکست نرم از سه مرحله ایجاد ریزحفره‌ها، رشد ریزحفره‌ها و به هم پیوستن ریزحفره‌ها و تشکیل حفره‌های بزرگ تشکیل می‌شود. تاکنون انواع مختلفی از مدل‌ها برای پیش‌بینی آغاز شکست نرم ارائه شده است: مدل‌های بر پایه مکانیزم، مدل‌های وابسته به پدیده‌شناسی و مدل‌های بر پایه مکانیک آسیب محیط پیوسته که از اصول ترمودینامیک حاصل شده‌اند. در این مطالعه از معیارهای شکست نرم بر پایه پدیده‌شناسی استفاده می‌شود. این نوع معیارها را می‌توان به عنوان فرایند انباشت آسیب در نظر گرفت. زمانی که انباشت آسیب به یک مقدار بحرانی برسد، شکست آغاز می‌شود. این معیارها را می‌توان بر حسب کمیت‌های مختلف مرتبط با تغییر شکل از قبیل تنش و کرنش بیان کرد. یکی از مزایای این نوع معیارها، سادگی به‌کارگیری آنها در مدل‌های اجزای محدود است.

نرم برای پیش‌بینی شروع ترک استفاده کردند. نتایج آنها پیش‌بینی مناسبی از شروع ترک در شکل‌دهی ورقی ارائه نمود [۱۱]. لاپوک^۱ و همکاران از مدل آسیب در پیش‌بینی عیوب در تغییر شکل پلاستیک شدید استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که در صورت استفاده از خصوصیات صحیح ماده و نیز کرنش شکست، شبیه‌سازی اجزای محدود به خوبی قادر به پیش‌بینی شروع ترک در قطعه است [۱۲]. کوآن^۲ و همکاران برای پیش‌بینی شروع ترک در آلیاژ Ti-10V-2Fe-3Al از آزمون فشار در دماها و نرخ‌های کرنش مختلف استفاده کردند. آنها با به‌کارگیری شبیه‌سازی در کنار آزمون‌های تجربی، به تعیین مقدار بحرانی آسیب در معیار کاک‌کرافت-لاتام پرداختند و بدین منظور یک مدل رگرسیون ارائه کردند [۱۳]. ژای^۳ و همکاران با لحاظ کردن دو کوپل پارامتر آسیب برای آسیب حفره و آسیب برشی در تابع واماندگی ماده به مدل‌سازی فرایند آسیب تیتانیوم خالص پرداختند. آنها پارامترهای مدل را با استفاده از داده‌های تجربی کالیبره کردند. تطابق بسیار خوبی بین شروع شکست و منحنی نیرو- جابه‌جایی گزارش کرده‌اند [۱۴]. چن^۴ و همکاران با استفاده از آزمون‌های تجربی و شبیه‌سازی، به بررسی رفتار آسیب نرم آلیاژ Ti-6Al-4V تحت آزمون فشار در دماهای مختلف و نرخ کرنش‌های $10000-2500 s^{-1}$ پرداختند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های آنها دارای سازگاری با آزمایش‌ها گزارش شده است [۱۵]. به منظور پیش‌بینی و جلوگیری از ایجاد ترک سطحی در شکل‌دهی لوله از جنس آلیاژ Ti-15-3، زو^۵ و همکاران شش معیار شکست نرم مختلف را در شبیه‌سازی خود به کار گرفتند. آنها با استفاده از معیار مک‌کلینتوک^۶ و پیش‌بینی مناسب توانستند ترک سطحی را حذف نمایند [۱۶]. گائو^۷ و همکاران به منظور برقراری رابطه میان پارامترهای شکل‌دهی و آغاز شکست نرم آلیاژ Ti-6Al-4V، از آزمون فشار نمونه‌های استوانه‌ای استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد با توجه به پارامترهای فرایند، آسیب بحرانی بین ۰/۰۷ تا ۰/۱۵ متغیر است [۱۷]. پاتر^۸ و همکاران از تست فشار چرخشی نمونه‌های دیسکی و استوانه‌ای برای تعیین آسیب بحرانی استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که با توجه به تفاوت قابل توجه حالت تنش در دو نمونه، نمونه‌های دیسکی آسیب بحرانی کمتری نشان می‌دهند [۱۸].

8 Pater
9 Oyane
10 Argon
11 Freundenthal
12 Brozzo
13 Cross Wedge Rolling

1 Lapavok
2 Quan
3 Zhai
4 Chen
5 Xu
6 McClintock
7 Gao

(۴) تقریباً تمام معیارهایی که در آن از انتگرال گیری تنش- کرنش استفاده می شود، صورت های مختلف معیار کار پلاستیک بحرانی به ازای واحد حجم فرودنتال^۱ هستند [۲۰]:

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \left[\frac{\sqrt{3}}{2(1-n)} \sinh \left\{ \frac{\sqrt{3}(1-n)}{2} \frac{\sigma_a + \sigma_b}{\bar{\sigma}} \right\} + \frac{3}{4} \frac{\sigma_a - \sigma_b}{\bar{\sigma}} \right] d\bar{\epsilon} = C_4$$

که در این رابطه n بیان کننده ضریب کرنش سختی در رابطه تنش-کرنش لودویک-هولومون^۵ و σ_a و σ_b تنش های اصلی در جهت بیشترین و کمترین تغییر شکل حفره هستند.

اویان^۶ با استفاده از قوانین پایه تئوری پلاستیسیته مواد متخلخل معیار زیر را استخراج کرد [۲۴]:

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} (1 + A \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}}) d\bar{\epsilon} = C_5 \quad (۵)$$

که در این رابطه A ثابتی مرتبط با ماده است که به صورت تجربی تعیین می شود. با توجه به اثر تنش هیدرواستاتیک بر روی بستن یا رشد حفره های کوچک، به صورت مستقیم در رابطه بالا این تنش دیده می شود؛ بنابراین تنش هیدرواستاتیک محدودکننده یا تحریک کننده رشد ترک ها است.

مقدار انتگرال سمت چپ تمام معیارهای بالا، مقدار آسیبی است که ماده طی تغییر شکل پلاستیک تحمل می نماید. همان گونه که اشاره شد، در صورتی که آسیب به مقدار بحرانی برسد، شکست رخ می دهد.

۳- آزمون تجربی

به منظور بررسی آغاز شکست نرم آلیاژ Ti-6Al-4V، نمونه هایی با هندسه دو مخروطی با دو ریزساختار هم محور و لایه ای ساخته شدند. تصویری از دو ریزساختار در شکل ۱ و ترکیب شیمیایی نمونه ها آن در جدول ۱ ارائه شده است. نمونه های ساخته شده به همراه ابعاد آنها نیز در شکل ۲ نمایش داده شده است. انتخاب هندسه قطعات به صورت دو مخروطی باعث می شود که شرایط ایجاد تنش کششی بر روی سطح خارجی شدیدتر شود. علاوه بر آن، ایجاد شیار بر روی بیشترین قطر منجر به تمرکز شدیدترین آسیب در قسمت شیار می شود که کار تشخیص ایجاد ترک را ساده تر می کند.

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \bar{\sigma} d\bar{\epsilon} = C_1 \quad (۱)$$

که در این رابطه $\bar{\sigma}$ تنش موثر و $\bar{\epsilon}$ کرنش موثر است. حاصل انتگرال گیری از رابطه (۱) تا کرنش موثر در لحظه ایجاد شکست، $\bar{\epsilon}_f$ ، برابر با مقدار C_1 است که میزان آسیب بحرانی را نشان می دهد. با توجه به اهمیت بزرگترین تنش کششی، کاک کرافت و لاتام^۲ معیار دیگری را بر پایه مقدار بحرانی انرژی کششی به ازای واحد حجم پیشنهاد نمودند [۲۱]:

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \bar{\sigma}_1 d\bar{\epsilon} = C_2 \quad (۲)$$

در این مدل به سادگی وابستگی بین مقدار بحرانی در شکست و سطح بزرگترین تنش اصلی، $\bar{\sigma}_1$ ، تعیین می شود. اگر چه طبق یک واقعیت تجربی مواد با شکل پذیری بسیار محدود را می توان تحت فشار هیدرواستاتیک با موفقیت تغییر شکل داد.

وابستگی مستقیم سطح بزرگترین تنش اصلی، $\bar{\sigma}_1$ و تنش هیدرواستاتیک، σ_m ، با اصلاح تجربی رابطه قبل توسط بروزو^۳ و همکاران پیشنهاد شده است [۲۲]:

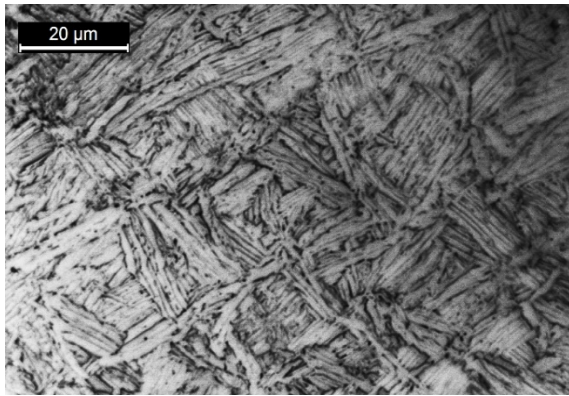
$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{2\sigma_1}{3(\sigma_1 - \sigma_m)} d\bar{\epsilon} = C_3 \quad (۳)$$

نتایج تجربی نشان داده است که شکست در فرایندهای فلزکاری از یک مدل رشد حفره تبعیت می کند. مطابق این مدل، حفره ها در ناخالصی ها یا ذرات سخت فاز ثانویه در ناحیه هایی که دچار تغییر شکل زیاد شده اند ایجاد شده و تحت تغییر شکل پلاستیک ناشی از تنش های نرمال یا برشی رشد نموده و نهایتاً به هم متصل می شوند تا یک حفره ماکروسکوپی را تشکیل دهند. بر پایه این فرضیه، چندین معیار مختلف برای شکست پیشنهاد شده است.

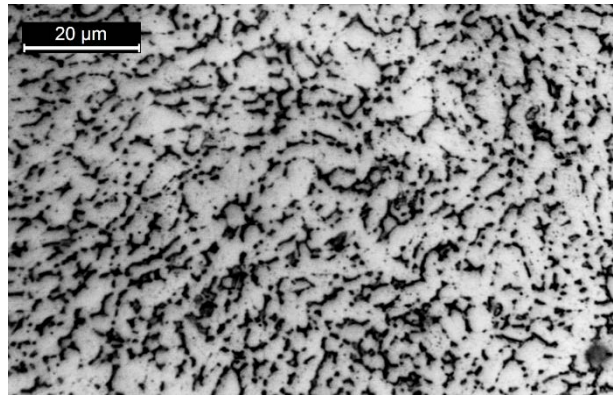
مک کلینتوک^۴ فرض کرده است که شکست زمانی رخ می دهد که فاصله بین حفره ها در ماده به یک مقدار بحرانی برسد. با این فرض معیار شکست به صورت زیر نوشته شده است [۲۳]:

4 McClintock
5 Ludwik-Holomon
6 Oyane

1 Freudenthal
2 Cockcroft and Latham
3 Brozzo



(ب)

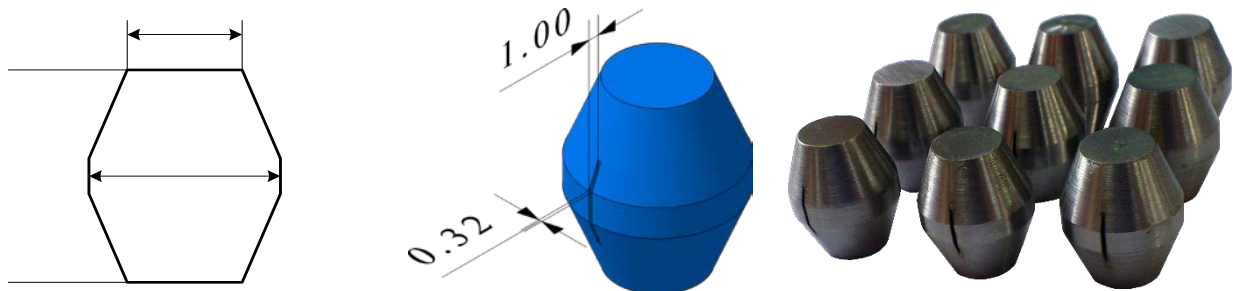


(الف)

شکل ۱. ریزساختار ماده اولیه (الف) هم محور و (ب) لایه‌ای

جدول ۱. ترکیب شیمیایی آلیاژ Ti-6Al-4V

عنصر	O	H	N	C	Fe	Al	V	Y	Ti
درصد	۰/۱۶۲	۰/۰۰۳	۰/۰۰۹	۰/۰۲۵	۰/۱۵۰	۶/۲۰	۴/۱۰	۰/۰۰۱	تعدادی



شکل ۲. نمونه‌های دو مخروطی به همراه ابعاد آن (ابعاد بر حسب میلی‌متر)

اطمینان حاصل شود. به منظور تشخیص نقطه آغاز ترک، در محدوده ایجاد ترک آزمون با تغییر کورس پرس به میزان mm ۰/۱ تکرار شد تا به خوبی بتوان نقطه آغاز را تشخیص داد.

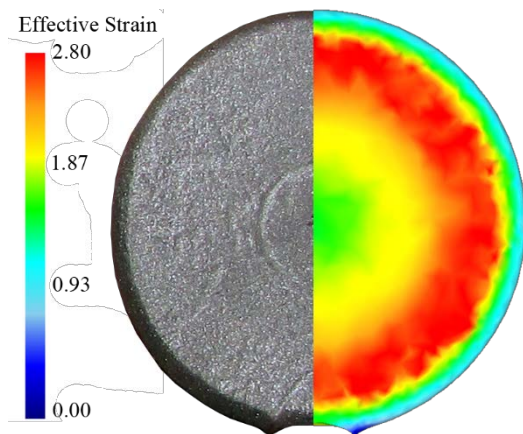
با توجه به اینکه اغلب تغییر شکل آلیاژ Ti-6Al-4V در محدوده دمایی دو فازی انجام می‌شود، دمای °C ۸۵۰ به عنوان کمترین دمای مورد استفاده و سرعت mm/min ۲۵۰ به عنوان سرعت مناسبی برای محدود کردن میزان افزایش دمای آدیاباتیک و جلوگیری از ایجاد باندهای برشی، به عنوان یک نقطه مرزی برای آزمون فشار هم‌دما انتخاب شد. به منظور کاهش فاکتور اصطکاک بین نمونه‌ها و فک‌های دستگاه، از روان‌کار پایه شیشه بر روی سطح قطعات استفاده شد تا علاوه بر کاهش اصطکاک، مانع از تشکیل لایه ترد غنی از اکسیژن بر روی سطح قطعات شود [۲۵]. پیش از آغاز آزمون، نمونه‌ها به مدت ۵ دقیقه در داخل کوره نگهداری شدند تا از توزیع یکنواخت دما در آنها

۴- شبیه‌سازی اجزای محدود

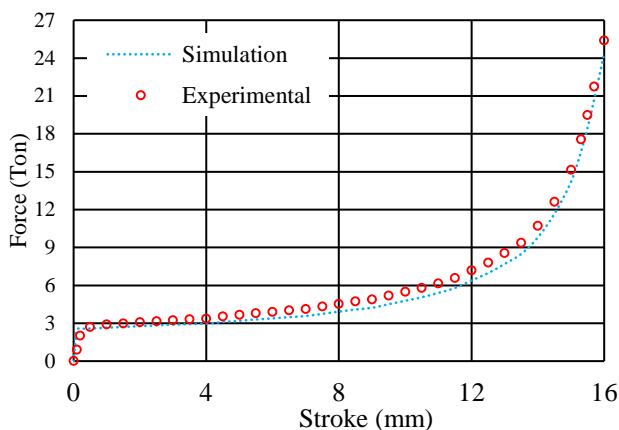
۵- بحث و بررسی

۵-۱- اعتبارسنجی و صحت‌سنجی مدل

با توجه به اینکه مقدار آسیب بحرانی و به عبارت دیگر مقدار تغییر شکل قابل تحمل ماده از نتایج شبیه‌سازی استخراج می‌شود، اطمینان از اعتبار و صحت نتایج شبیه‌سازی دارای اهمیت بالایی است. در شکل ۴ هندسه قطعه تغییر شکل یافته طی آزمون فشار با نمونه شبیه‌سازی شده ارائه شده است که تطابق خوبی مشاهده می‌شود. به منظور بررسی صحت نتایج، نیروی مورد نیاز برای انجام فشار داغ طی شبیه‌سازی در دمای 850°C و سرعت 250 mm/min با مقدار اندازه‌گیری شده طی آزمون فشار با هم مقایسه و در شکل ۵ ارائه شده است. نتایج نشان دهنده صحت مناسب مدل‌سازی و داده حاصل از شبیه‌سازی است.

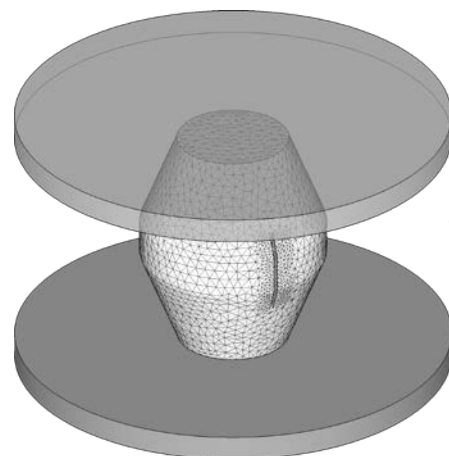


شکل ۴. مقایسه نمونه آزمون فشار و توزیع تنش متناظر



شکل ۵. نیروی فرایند فشار داغ نمونه به ریزساختار هم‌محور

به‌منظور تعیین آسیب بحرانی متناظر با آغاز ایجاد ترک سطحی در نمونه‌ها، لازم است شبیه‌سازی فرایند مطابق با پارامترهای آزمون تجربی انجام شود و در کاهش ارتفاع متناظر با شروع ترک، مقدار آسیب بحرانی از شبیه‌سازی استخراج شود. مدل اجزای محدود مورد نیاز برای شبیه‌سازی آزمون فشار نمونه‌های دو مخروطی که با استفاده از نرم‌افزار تجاری Deform-3D توسعه یافت، در شکل ۳ نشان داده شده است. در این مدل فک‌ها به صورت صلب و قطعه‌کار با رفتار صلب-ویسکوپلاستیک در نظر گرفته شده‌اند. مش‌بندی قطعه با حدود 17000 المان چهاروجهی انجام شد، که با توجه به اهمیت تعیین پارامتر آسیب در قسمت شیار، اندازه متوسط المان‌ها در مجاورت شیار حدود 0.2 mm و در دیگر قسمت‌ها حدود 0.6 mm انتخاب شد. نظر به انجام فرایند به صورت هم‌دم، دمای اولیه قطعه، فک‌های دستگاه فشار و دمای محیط (کوره) برابر با دمای تست و ضریب انتقال حرارت بین قطعه و فک‌های دستگاه فشار برابر با W/mK فرض شد. نظر به اهمیت تنش سیلان ماده و نیز اصطکاک و تاثیر آن بر روی توزیع تنش، کرنش و در نتیجه مقدار آسیب، از مدل اصطکاکی ترسکا بر حسب دما و سرعت تغییر شکل برای روان‌کار مورد نظر بهره گرفته شد [۲۵]. به منظور تعیین معیاری برای آغاز ترک خوردن ماده Ti-6Al-4V ، محاسبه مقدار پارامتر آسیب بر اساس مدل‌های کاک‌کرافت-لاتام، بروزو و مک‌کلینتوک در شبیه‌سازی انجام شد. شرایط دما و سرعت حرکت فک‌ها مطابق با آزمون تجربی انتخاب شد.

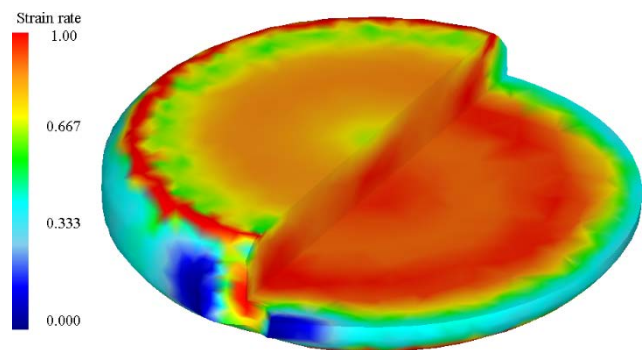


شکل ۳. مدل اجزای محدود آزمون فشار داغ نمونه‌های دو مخروطی

۵-۲- تغییر شکل نمونه‌های دارای ریزساختار اولیه

هم‌محور

با توجه به توزیع نرخ کرنش در قطعه در حال تغییر شکل (شکل ۶) و با توجه به نمودار فرایندی مربوط به ریزساختار هم‌محور، تغییر شکل در ناحیه بازیابی دینامیکی انجام می‌شود که با لغزش مرزخانه‌ها بر روی یکدیگر، ریزساختار هم‌محور حفظ می‌شود و تغییر شکل‌های بزرگی را ممکن می‌سازد [۲۶].

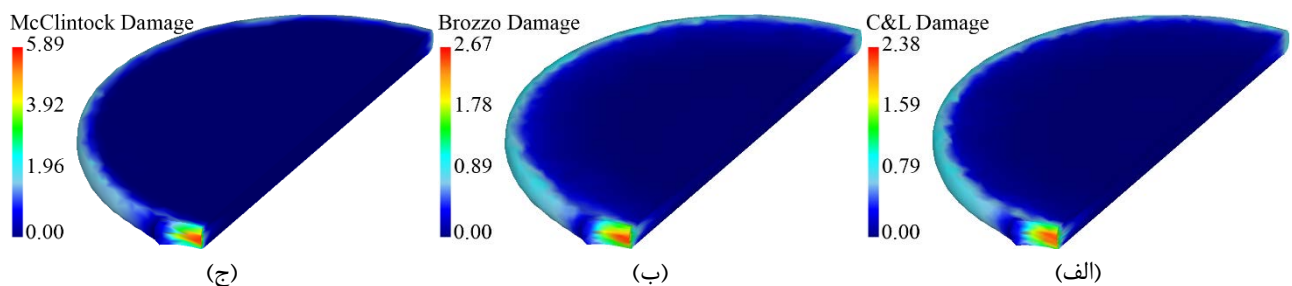


شکل ۶. توزیع نرخ کرنش برای نمونه دارای ریزساختار هم‌محور در دمای ۸۵۰ °C و سرعت ۲۵۰ mm/min

در شکل ۷ نمونه تغییر شکل یافته با ریزساختار اولیه هم‌محور دیده می‌شود. با وجود ایجاد شیار و فراهم ساختن تمرکز تنش در شیار، نمونه عاری از عیب حاصل شد که نشان دهنده سطح تحمل تنش قابل توجهی است. با توجه به سلامت نمونه‌ها پس از تحمل تغییر شکل شدید، امکان تعیین آسیب بحرانی برای نمونه‌های دارای ریزساختار اولیه هم‌محور وجود نداشت. با این وجود تعیین آسیب انباشته شده در قطعه تا مرحله تغییر شکل یافته را می‌توان به عنوان سطحی از آسیب مجاز برای آلیاژ Ti-6Al-4V با ریزساختار اولیه هم‌محور در نظر گرفت. توزیع پارامتر آسیب در نمونه‌های تغییر شکل یافته با ریزساختار اولیه هم‌محور در شکل ۸ ارائه شده است. مطابق با نتایج حاصل، طبق معیارهای کاک‌کرافت- لاتام، بروزو و مک‌کلینتوک، به ترتیب تا آسیب ۲/۳۸، ۲/۶۷ و ۵/۸۹ بدون ایجاد ترک در قطعه قابل تحمل است. مقدار به دست آمده بسیار بیشتر از مقادیر گزارش شده برای معیار کاک‌کرافت- لاتام توسط گائو و همکاران است [۱۷].



شکل ۷. نمونه تغییر شکل یافته با ریزساختار اولیه هم‌محور



شکل ۸. توزیع آسیب در نمونه‌های دارای ریزساختار اولیه هم‌محور (الف) مدل کاک‌کرافت- لاتام، (ب) مدل بروزو و (ج) مدل مک‌کلینتوک.

۵-۳- تغییر شکل نمونه‌های دارای ریزساختار اولیه لایه‌ای

کارپذیری ماده می‌شود [۲۷]. مطابق با توزیع آسیب در قطعه، اولین قسمتی که در اثر تنش‌های کششی و انباشت آسیب مستعد شکست است، قسمت مرکزی شیار ایجاد شده بر محیط خارجی قطعه است. به منظور تعیین آستانه ایجاد شکست بر روی نمونه، ارتفاع تغییر شکل نمونه‌های مختلف به صورت تدریجی کاهش یافت تا بتوان شروع ایجاد ترک را تشخیص داد. در شکل ۹ نمونه‌های مختلفی که در دمای 850°C و سرعت 250 mm/min تحت تغییر شکل قرار گرفته‌اند، مشاهده می‌شوند.

بر خلاف نمونه‌های دارای ریزساختار هم‌محور که بدون ایجاد عیب حد آسیب بالایی را تحمل نمودند، نمونه‌های دارای ریزساختار لایه‌ای قادر به تحمل چنین آسیبی نبودند. با توجه به نمودار فرایندی مربوط به ریزساختار لایه‌ای آلیاژ Ti-6Al-4V، در محدوده دمایی و نرخ کرنش مورد نظر، ایجاد ترک در مرزدهانه‌های β اولیه می‌تواند منجر به کاهش قابل توجه

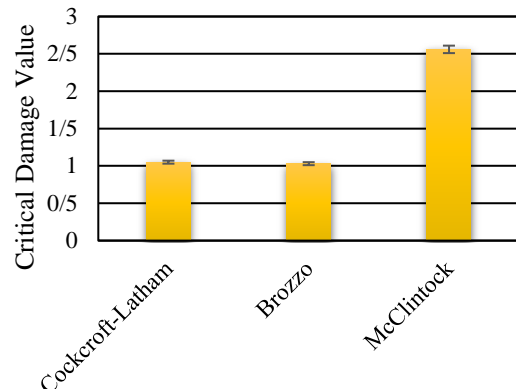


شکل ۹. نمونه تغییر شکل یافته با ارتفاع‌های مختلف با ریزساختار اولیه لایه‌ای

۵-۴- نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت تعیین حد مجاز تغییر شکل در طراحی موفق فرایند شکل‌دهی قطعات از جنس آلیاژ پرکاربرد Ti-6Al-4V، در این مقاله به مطالعه مقدار آسیب بحرانی پرداخته شد. بدین منظور قطعاتی با هندسه دو مخروطی دارای شیار بر روی قطر بیشینه با دو ریزساختار اولیه هم‌محور و لایه‌ای ساخته شدند و در دمای 850°C و با سرعت 250 mm/min تحت آزمون فشار قرار گرفتند. نتایج بررسی نشان داد که ریزساختار اولیه هم‌محور به خوبی تحمل آسیب انباشته را فراهم می‌کند و تا آسیب $2/38$ ، $2/67$ و $5/89$ به ترتیب بر اساس معیارهای کاک کرافت-لاتام، بروزو و مک کلینتوک ترکی بر روی قطعات مشاهده نشد. اما در صورتی که نمونه اولیه دارای ریزساختار لایه‌ای باشد، حد تحمل آسیب به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد و آسیب بحرانی از تطابق نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود با آزمون تجربی به ترتیب بر اساس معیارهای کاک کرافت-لاتام، بروزو و مک کلینتوک برابر $1/05 \pm 0/02$ ، $1/03 \pm 0/02$ و $2/56 \pm 0/05$ به دست آمد.

با توجه به اینکه نمونه‌های دارای ریزساختار اولیه لایه‌ای دچار شکست شدند، تعیین مقدار آسیب بحرانی برای آن امکان‌پذیر است. با محاسبه پارامترهای آسیب مک کلینتوک، بروزو و کاک کرافت-لاتام در شبیه‌سازی متناظر با آزمایش‌ها، مقدار آسیب بحرانی مطابق با هر یک از سه معیار به دست آمده و در نمودار شکل ۱۰ ارائه شده است. با توجه به حساسیت هر یک از معیارها به مقدار تغییر شکل و با توجه به تغییر $0/1\text{ mm}$ طول کورس در نمونه‌های مختلف، خطای مقادیر آسیب بحرانی مدل‌های کاک کرافت-لاتام و بروزو برابر با $0/2 \pm$ و برای مدل مک کلینتوک برابر با $0/5 \pm$ تخمین زده شد.



شکل ۱۰. مقدار آسیب بحرانی بر اساس معیارهای مختلف

no. 9, pp. 1885-1890, 2010/09/01 2010, doi: 10.1007/s12206-010-0605-z.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

تشکر و قدردانی

از مشاوره ارزشمند جناب آقای دکتر محمد حبیبی پارسا در انجام آزمایش‌ها سپاس‌گزاری می‌شود.

مراجع

- [10] Y. Zhu, W. Zeng, F. Zhang, Y. Zhao, X. Zhang, and K. Wang, "A new methodology for prediction of fracture initiation in hot compression of Ti40 titanium alloy," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 553, pp. 112-118, 2012.
- [11] Y. Lou and H. Huh, "Prediction of ductile fracture for advanced high strength steel with a new criterion: Experiments and simulation," *J Mater Process Technol*, vol. 213, no. 8, pp. 1284-1302, 8// 2013, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.03.001>.
- [12] R. Lapovok, V. Mendoza, V. N. Anumalasetty, and P. D. Hodgson, "Prediction of ductile failure in CP-Titanium as criterion of SPD process design," *J Mater Process Technol*, vol. 229, pp. 678-686, 2016.
- [13] G.-Z. Quan, Z.-Y. Zou, D.-S. Wu, and J.-T. Liang, "Prediction of ductile fracture initiation for Ti-10V-2Fe-3Al alloy by compressions at different temperatures and strain rates," *Materials at High Temperatures*, vol. 33, no. 1, pp. 6-14, 2016.
- [14] J. Zhai *et al.*, "Modeling the ductile damage process in commercially pure titanium," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 91, pp. 26-45, 2016.
- [15] G. Chen, C. Ren, L. Lu, Z. Ke, X. Qin, and X. Ge, "Determination of ductile damage behaviors of high strain rate compression deformation for Ti-6Al-4V alloy using experimental-numerical combined approach," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 200, pp. 499-520, 2018.
- [16] W. Xu, H. Wu, H. Ma, and D. Shan, "Damage evolution and ductile fracture prediction during tube spinning of titanium alloy," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 135, pp. 226-239, 2018.
- [17] L. Gao, J. Zhao, G.-z. Quan, W. Xiong, and C. An, "Study on the Evolution of Damage Degradation at Different Temperatures and Strain Rates for Ti-6Al-4V Alloy," *High Temperature Materials and Processes*, vol. 38, no. 2019, pp. 332-341, 2019.
- [18] Z. Pater, J. Tomczak, and T. Bulzak, "Rotary compression as a new calibration test for prediction of a critical damage value," *Journal of Materials Research and Technology*, 2020.
- [19] Z. Pater, J. Tomczak, T. Bulzak, Ł. Wójcik, and P. Walczuk, "Assessment of ductile fracture criteria with respect to their application in the modeling of cross wedge rolling," *J Mater Process Technol*, vol. 278, p. 116501, 2020.
- [1] R. Hambli and D. Badie-Levet, "Damage and fracture simulation during the extrusion processes," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 186, no. 1, pp. 109-120, 2000.
- [2] A. T. Domanti, D. J. Horrobin, and J. Bridgwater, "An investigation of fracture criteria for predicting surface fracture in paste extrusion," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 44, no. 7, pp. 1381-1410, 2002.
- [3] R. Hambli and M. Reszka, "Fracture criteria identification using an inverse technique method and blanking experiment," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 44, no. 7, pp. 1349-1361, 2002.
- [4] A. Ragab, "Fracture limit curve in upset forging of cylinders," *Mater Sci Eng A*, vol. 334, no. 1, pp. 114-119, 2002.
- [5] S. Wan Chung, S. Jo Kim, and J. Hee Kim, "Finite element simulation of metal forming and in-plane crack propagation using ductile continuum damage model," *Computers & structures*, vol. 80, no. 23, pp. 1771-1788, 2002.
- [6] K. Komori, "Ductile fracture criteria for simulating shear by node separation method," *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 43, no. 1, pp. 101-114, 2005.
- [7] K. Saanouni, "On the numerical prediction of the ductile fracture in metal forming," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 75, no. 11, pp. 3545-3559, 2008.
- [8] M. Zhan, C. Gu, Z. Jiang, L. Hu, and H. Yang, "Application of ductile fracture criteria in spin-forming and tube-bending processes," *Computational Materials Science*, vol. 47, no. 2, pp. 353-365, 2009.
- [9] J.-S. Choi, H.-C. Lee, and Y.-T. Im, "A study on chevron crack formation and evolution in a cold extrusion," (in English), *J Mech Sci Technol*, vol. 24,

- [20] A. M. Freudenthal, *The Inelastic Behavior of Solids*. New York: Wiley, 1950.
- [21] M. Cockcroft and D. Latham, "Ductility and the workability of metals," *Journal Institute of Metals*, vol. 96, no. 1, pp. 33-39, 1968.
- [22] P. Brozzo, B. Deluca, and R. Rendina, "A new method for the prediction of formability limits in metal sheets," in *Proc. 7th biennal Conf. IDDR*, 1972.
- [23] F. A. McClintock, "A criterion for ductile fracture by the growth of holes," *J Appl Mech*, vol. 35, no. 2, pp. 363-371, 1968.
- [24] M. Oyane, T. Sato, K. Okimoto, and S. Shima, "Criteria for ductile fracture and their applications," *J Mech Work Technol*, vol. 4, no. 1, pp. 65-81, 1980.
- [25] S. J. Mirahmadi, M. Hamed, and M. Cheraghzadeh, "Investigating friction factor in forging of Ti-6Al-4V through isothermal ring compression test," *Tribology Transactions*, vol. 58, no. 5, pp. 778-785, 2015.
- [26] Y. Prasad, T. Seshacharyulu, S. Medeiros, and W. Frazier, "Microstructural modeling and process control during hot working of commercial Ti-6Al-4V: Response of lamellar and equiaxed starting microstructures," *Mater Manuf Process*, vol. 15, no. 4, pp. 581-604, 2000.
- [27] T. Seshacharyulu, S. Medeiros, W. Frazier, and Y. Prasad, "Microstructural mechanisms during hot working of commercial grade Ti-6Al-4V with lamellar starting structure," *Mater Sci Eng A*, vol. 325, no. 1, pp. 112-125, 2002.



COPYRIGHTS

© 2021 by the authors. Licensee Iranian Space Research Center of Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)