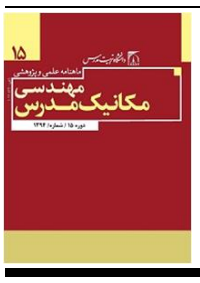
مجله مهندسی مکانیک مدرس، اسفند 1394، دوره 15، شماره 12، ص‌ص 107-112

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir



پارامترهای موثر در نیروی فرآیند اکستروژن پیش‌فرم پره آلیاژ Ti-6Al-4V

مهدی تاجداری[1*]، علی عبدالهی خانگاهی[2]، حمید عربی[3]

1- استاد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اراک، گروه مهندسی مکانیک، اراک، ایران
2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران
3- کارشناسی ارشد، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران
* اراک، صندوق‌پستی 38161-19135، me-tajdari@iau-arak.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 23 تیر 1394
پذیرش: 04 مهر 1394
ارائه در سایت: 24 آبان 1394

کلید واژگان:
فرآیند اکستروژن
پیش‌فرم پره
آلیاژ Ti-6Al-4V

چکیده

نرم‌افزار المان محدود سه‌بعدی "دفرم" برای توصیف رفتار تغییرشکل پلاستیک قطعه‌کار Ti-6Al-4V در طی فرآیند اکستروژن پیش‌فرم پره استفاده شده است. تحت شرایط اکستروژن مختلف، بررسی آنالیز عددی پارامتر نیروی فرآیند در طی فرآیند اکستروژن ارائه شده است. اثرات نسبی دمای بیلت، ضریب اصطکاک و دمای قالب روی نیروی فرآیند مورد بررسی قرار گرفت. برای تعیین ضریب اصطکاک فرآیند، آزمون فشار حلقه روی آلیاژ Ti-6Al-4V با روان‌کاری شیشه انجام پذیرفت. همچنین آزمایش تجربی برای تولید پیش‌فرم پره Ti-6Al-4V توسط فرآیند اکستروژن با موفقیت انجام پذیرفت. مشاهده شد که درجه حرارت اولیه بیلت تاثیر زیادی در نیروی فرآیند اکستروژن پیش‌فرم پره آلیاژ Ti-6Al-4V دارد. تاثیر دمای قالب در مقایسه با تاثیر دمای بیلت در نیروی فرآیند کمتر می‌باشد. با افزایش دمای قالب، نیروی فرآیند کاهش می‌یابد. در آزمون‌های تجربی مشاهده شد که فرآیند انتقال بیلت از کوره به قالب تاثیر بسزایی در انجام یا عدم انجام فرآیند اکستروژن دارد زیرا فرآیند انتقال بیلت از کوره به قالب مستقیما باعث تغییر دمای اولیه بیلت درست قبل از فرآیند اکستروژن می‌شود. با کاهش زمان انتقال و جاگذاری بیلت از کوره به قالب، دمای بیلت در اثر مجاورت بیلت با هوای محیط، کاهش کمتری داشته و در نتیجه شکل‌دهی آن آسان‌تر می‌شود. همچنین با افزایش ضریب اصطکاک، نیروی لازم جهت اکستروژن پیش‌فرم پره آلیاژ Ti-6Al-4V نیز افزایش می‌یابد.

Effective parameters on force of Ti-6Al-4V alloy blade preform extrusion process

Mehdi Tajdari[1*], Ali Abdollahi khangahi[2], Hamid Arabi[2]

1- Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Arak Branch, Arak, Iran
2- Department of Mechanical Engineering, Malek e ashtar University of Technology, Tehran, Iran
* P.O.B. 38161-19135, Arak, Iran, me-tajdari@iau-arak.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 14 July 2015
Accepted 26 September 2015
Available Online 15 November 2015

Keywords:
Extrusion process
blade perform
Ti-6Al-4V alloy

ABSTRACT

"DEFORM" three-dimensional finite element software is used to describe the behavior of plastic deformation of Ti-6Al-4V workpiece during blade preform extrusion process. Under different conditions of extrusion, numerical analysis of the process force parameter during extrusion process is presented. The relative effects of billet temperature, friction coefficient and die temperature on process force were investigated. To determine the process friction coefficient, the ring compression test of Ti-6Al-4V alloy with glass lubrication was performed. Also experimental tests were successfully done in order to manufacture blade preform. It was observed that billet temperature has much effect on force of Ti-6Al-4V alloy blade preform extrusion process. Die temperature has effect on the process force but its effect is not as much as the effect of the billet temperature. By increasing of the die temperature, the process force decreases. Experimental tests showed that the billet transfer process from the furnace to die has important effect on done or not done of the extrusion process because the billet transfer process from the furnace to die is cause of alters the billet initial temperature just before extrusion process. By reducing of the placing and transfer time of billet from the furnace to die, due to the vicinity of the billet and air, billet temperature have less reduction and therefore it becomes easier to shape. Also by increasing the friction coefficient, the force required for extrusion of Ti-6Al-4V alloy blades preform increased.

1- مقدمه

آلیاژ Ti-6Al-4V پرکاربردترین آلیاژ تیتانیوم می‌باشد. این آلیاژ یک آلیاژ دوفازی با چگالی کم، استحکام بالا و مقاومت به خوردگی عالی است و یک انتخاب ایده‌آل برای کاربرد در صنایع هوافضا می‌باشد. فرآیند شکل‌دهی شمش آلیاژ Ti-6Al-4V در دمای بالای دمای استحاله بتا انجام می‌گیرد. در بالای دمای استحاله بتا، Ti-6Al-4V دارای ریزساختار تک‌فازی بتا (با شبکه کریستالی مکعبی مرکزدار[1]) و در زیر این دما دارای ریزساختار دوفازی آلفا (با

1- bcc

Please cite this article using:
M. Tajdari, A. Abdollahi khangahi, H. Arabi, Effective parameters on force of Ti-6Al-4V alloy blade preform extrusion process*, Modares Mechanical Engineering,* Vol. 15, No. 12, pp. 107-112, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

شبکه کریستالی شش وجهی فشرده[1]) و بتا می‌باشد. خنک‌کاری از ریزساختار تک‌فازی بتا باعث تولید ریزساختار لایه‌ای می‌شود که ممکن است برای برخی از کاربردها نامناسب باشد؛ بنابراین فرآیند شکل‌دهی باید به‌گونه‌ای طراحی شود که دمای قطعه‌کار در طول فرآیند شکل‌دهی از دمای استحاله بتا بالاتر نرود [1]. از طرفی تنش جریان آلیاژ Ti-6Al-4V به تغییرات درجه حرارت بسیار حساس است بطوری که اگر دمای بیلت از حد معینی کمتر باشد به دلیل افزایش بیش از حد استحکام تسلیم آن، فرآیند اکستروژن انجام نمی-پذیرد [1]. بنابراین ضروری است که فرآیند اکستروژن آلیاژ Ti-6Al-4V در یک محدوده دمایی معینی انجام پذیرد. در اکستروزن آلیاژهای تیتانیوم، شیشه به‌عنوان روان‌کار به قطعه‌کار اعمال می‌شود که همچنین به‌عنوان یک عایق حرارتی برای کاهش اثر سرمایش قالب نیز عمل می‌کند [2]. یکی از کاربردهای آلیاژ Ti-6Al-4V تولید پره‌های موتور هواپیما از این آلیاژ می‌باشد. برای تولید این پره‌ها، یک بیلت اولیه در دو مرحله اکستروژن و فورج به پره تغییرشکل داده می‌شود. در این مقاله شبیه‌سازی و ساخت پیش‌فرم پره آلیاژ Ti-6Al-4V با استفاده از فرآیند اکستروژن بررسی شده است.

نتایج تعدادی از تحقیقات در مورد اکستروژن مستقیم غیرهم‌دمای آلیاژ Ti-6Al-4V منتشرشده است. اوی و همکارانش (1998) طراحی پیش‌فرم برای آهنگری قطعات آیرودینامیکی (مانند پره) را با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود انجام دادند. مشاهده شد که شکل پیش‌فرم روی جریان فلزی، تغییرشکل پلاستیک، نیروی شکل‌دهی و توزیع فشار تماسی در قالب (در مرحله آهنگری پیش‌فرم) تاثیرگذار می‌باشد [3]. آزمایش حلقه روی نمونه‌ای از جنس Ti-6Al-4V با روان‌کاری شیشه[2] که به هر دو سمت نمونه آغشته شده بود، توسط لی و همکارانش (2000) انجام شد [4]. وقوع ناپایداری‌های جریان در طول کار گرم آلیاژ Ti-6Al-4V با کمک آزمون فشار گرم توسط سشاچاریولو و همکارانش (2001) مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که این مواد دارای جریان پایدار در نرخ کرنش پایین می‌باشند [5]. لی و همکارانش همچنین (2002) اکستروژن گرم آلیاژ Ti-6Al-4V را با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود مورد بحث و بررسی قرار دادند. در این تحقیق نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها با نتایج آزمایش های تجربی مقایسه شدند. توزیع کرنش، درجه حرارت و تنش موثر تحت شرایط مختلف طراحی و تولید توسط آن‌ها مورد بحث و بررسی قرار گرفت [6]. اصول و مهارت‌های اکستروژن گرم آلیاژ Ti-6Al-4V توسط برگمینی و همکارانش (2003) مورد بررسی قرار گرفت. تحقیقات آن‌ها نشان داد که دمای تغییرشکل پلاستیک گرم بایستی کمی بالاتر از دمای انتقال بتا باشد [7]. راه‌کارهای پیش‌بینی و کنترل اعوجاج قطعه‌کار در طی اکستروژن گرم آلیاژهای تیتانیوم توسط دامودران و همکارانش (2004) بررسی شد [8]. براسچی و همکارانش (2004) کارپذیری داغ آلیاژ Ti-6Al-4V را به‌وسیله آزمون فشار گرم انجام دادند. آن‌ها اثر ویژگی‌های ریز ساختار را روی نمونه تغییرشکل یافته مورد بررسی قرار دادند [9]. زربتسو و همکارانش (2008) اثر اکستروژن هیدرواستاتیک را روی ساختار و خواص مکانیکی آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V با ریزساختار چند لایه بررسی کردند. آنها دریافتند که اکستروژن هیدرواستاتیک باعث افزایش قابل توجه استحکام آلیاژ می‌شود [10]. علی‌میرزالو و همکارانش (2010) طراحی پیش‌فرم برای آهنگری غیر هم‌دما پره کمپرسور توربین گازی را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که شکل پیش‌فرم پره نقش مهمی را در وضعیت آن داخل حفره قالب طی فرآیند آهنگری دارد[11]. عنایتی و همکارانش (2011) تاثیر کاهش و درجه حرارت قطعه‌کار اولیه که از جنس Ti-6Al-4V می‌باشد را روی نیروی موردنیاز برای اکستروژن، ایجاد کرنش حداکثر و تشکیل ترک‌های سطحی را مورد بحث و بررسی قرار دادند. این تحقیق نشان داد که افزایش درجه حرارت و تغییرشکل پلاستیک ممکن است به ترک‌های سطحی منجر شود [2]. میرمحمدی و همکارانش (2014)، اثرات و اهمیت پارامترهای فرآیند و هندسه قالب در نیروی اکستروژن و افزایش دمای بی‌درو را بررسی کردند [1].

بررسی مقالات منتشرشده نشان می‌دهد که تعداد مقالات مرتبط با اکستروژن پیش‌فرم پره آلیاژ Ti-6Al-4V بسیارمحدود است. پاره‌ای تحقیقات درباره پارمترهای موثر بر نیروی فرآیند اکستروژن آلیاژ Ti-6Al-4V وجود داشته؛ اما هیچ تحقیق کاملی در مورد نیروی فرآیند اکستروژن پیش‌فرم پره آلیاژ Ti-6Al-4V که دارای حفره قالب پیچیده‌ای می‌باشد، وجود ندارد. برای این منظور یک مدل المان محدود سه‌بعدی اکستروژن مستقیم اتخاذ شده و این مدل توسط آزمایش‌های تجربی تایید شد. سپس از این مدل برای شبیه-سازی اکستروژن مستقیم غیرهم‌دمای پیش‌فرم پره آلیاژ Ti-6Al-4V با پارامترهای مختلف استفاده شد. اثر پارامترهای زمان انتقال بیلت از کوره به قالب، دمای قالب و اصطکاک فرآیند در نیروی فرآیند به دقت بررسی شد تا درنهایت بتوان پره‌ای تولید کرد که بهینه‌ترین حالت را دارا باشد.

2- طراحی و تحلیل فرآیند

اگرچه به منظور تولید پره‌های تیتانیومی کمپرسور موتور هواپیما از فرایند فورج استفاده می‌گردد، اما نظر به این‌که شکل هندسی این پره‌ها بسیار پیچیده است نمی‌توان تنها در طی یک مرحله فورج، بیلت اولیه (که معمولا به صورت استوانه‌ای است) را به طور مستقیم به شکل پره‌ی نهایی درآورد. چنین کاری از آن‌جا که مستلزم ایجاد تغییر شکل شدید در ماده و وادار نمودن حجم زیادی از ماده به جریان می‌باشد نیازمند تامین نیروهای بسیار زیاد بوده و منجر به ایجاد سایش شدید قالب (به دو علت نیروی اعمالی زیاد و حرکت نسبی زیاد بین قالب و ماده)، شکست ناگهانی قالب و عدم امکان کنترل خواص متالورژیکی پره‌ی نهایی خواهد شد. از این‌رو انجام یک فرایند میانی پریفورم‌سازی برای این‌که شکل هندسی قطعه به شکل نهایی نزدیک شود ضروری است. مهمترین فرایند پیشنهاد شده برای ساخت پریفورم فورج پره، فرآیند اکستروژن است.

2-1- اتخاذ مدل المان محدود

یک مدل‌سازی ترمودینامیکی برپایه روش‌های المان محدود پلاستیک- صلب برای شبیه‌سازی فرآیند اکستروژن با پارامترهای طراحی مختلف، اتخاذ شد. در این تحقیق از نرم‌افزار المان محدود دفرم برای انجام شبیه‌سازی‌ها استفاده شده است. هندسه قطعه‌کار، قالب و رم در نرم‌افزارهای کد[3] (طراحی به کمک کامپیوتر) طراحی شد و سپس به نرم‌افزارهای المان محدود و با فرمت استاندارد اس تی ال[4] انتقال یافت. قالب و رم به‌عنوان جسم صلب و قطعه‌کار به‌عنوان جسم پلاستیک- صلب در نظر گرفته شد. در شکل 1 مدل بیلت اولیه و قطعه‌کار نهایی را مشاهده می‌کنید.

مطابق شکل 2–a برای تحلیل تغییرشکل بیلت، از المان‌بندی مطلق سه ضلعی با تعداد المان 34320 (با اندازه کوچک‌ترین المان 0.3) استفاده شد. با انجام شبیه‌سازی‌های متعدد و مقایسه نتایج آن با نتایج آزمایش‌های تجربی، این نوع المان‌بندی (با در نظر گرفتن دو فاکتور زمان انجام شبیه-سازی و دقت نتایج شبیه‌سازی) برای قطعه‌کار تعیین شد.

1- hcp
2- A5 glass
3- CAD
4- STL

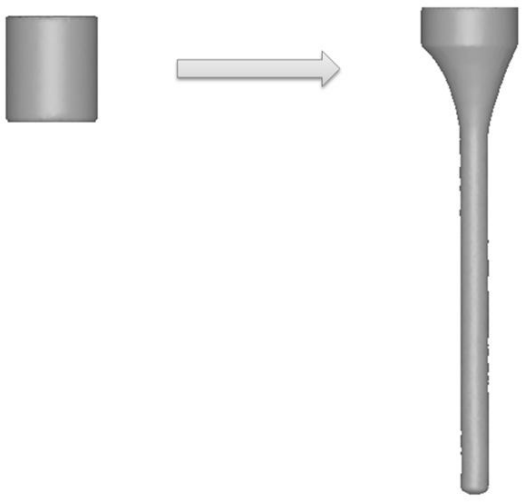


Fig. 1 Model of billet and preform

شکل 1 مدل بیلت اولیه و قطعه‌کار نهایی

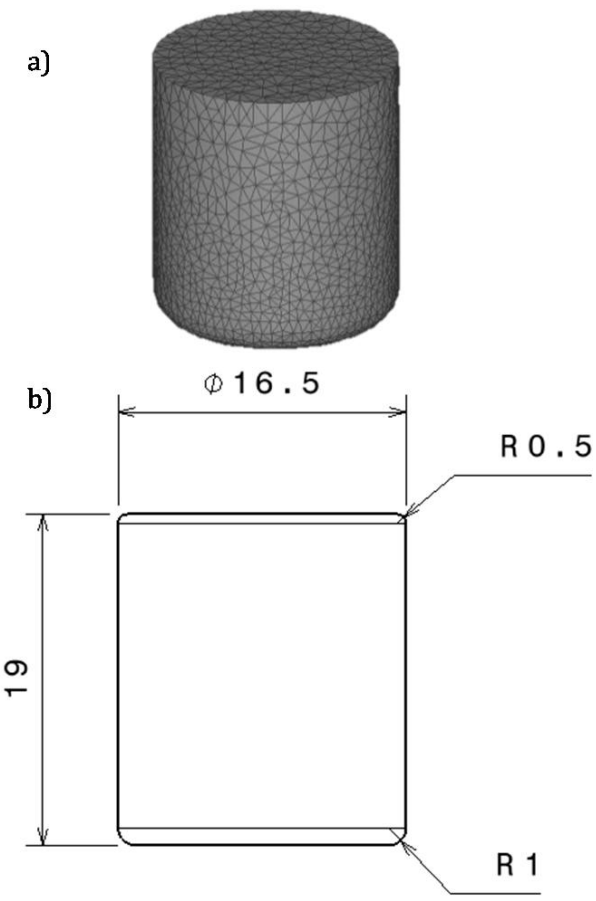


Fig.2 Initial billet model a) Finite-element model of billetb) Geometric dimensions of billet

شکل 2 مدل بیلت اولیه الف) المان بندی بیلت ب) ابعاد هندسی بیلت

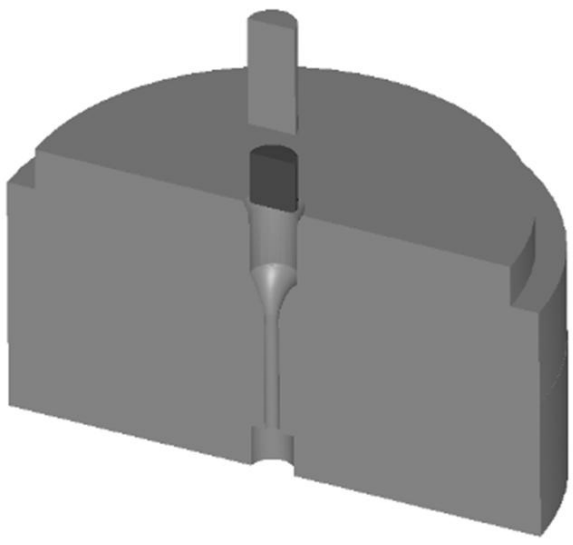


Fig. 3Model of billet, punch and die

شکل 3 مدل شبیه‌سازی قالب، سنبه و بیلت

همچنین ابعاد هندسی بیلت اولیه در شکل b-2 نشان داده شده است. در شکل3 هندسه قالب، سنبه و بیلت مشاهده می‌شود.

2-2- پارامترهای اتخاذ شده برای مطالعه اثرات آن‌ها

فرآیند اکستروژن پیش‌فرم پره آلیاژ Ti-6Al-4V در حالت گرم غیرهم‌دما انجام می‌پذیرد. ازاین‌رو قبل از انجام فرآیند دمای اولیه بیلت با استفاده از یک کوره تا 975 درجه سانتی‌گراد افزایش داده می‌شود. در این تحقیق دمای قالب در محدوده 350 الی 500 درجه سانتی‌گراد و نیز دمای سنبه برابر 20 درجه سانتی‌گراد می‌باشد. در شکل4 قالب مونتاژ شده روی پرس اکستروژن هیدرولیکی 50 تنی مشاهده می‌شود. فرآیند تولید پیش‌فرم پره تیتانیومی در سه مرحله انجام می‌پذیرد. مرحله اول شامل انتقال بیلت گرم شده از کوره به قالب می‌باشد؛ مرحله دوم شامل جاگذاری بیلت در قالب می‌باشد و مرحله سوم انجام فرآیند اکستروژن را شامل می‌شود.

در این تحقیق از زمان‌های انتقال 2 تا 12 ثانیه در شبیه‌سازی‌ها استفاده شده است تا تاثیر آن روی نیروی فرآیند مشاهده شود. همچنین فرآیند در قالب با دماهای مختلف 350، 400، 450 و 500 درجه سانتی-گراد انجام پذیرفت تا تاثیر دمای قالب روی نیروی فرآیند نیز مشخص گردد.

چون در آزمایش تجربی این فرآیند از شیشه به عنوان روان‌کار استفاده شده است؛ برای تعیین ضریب اصطکاک فرآیند، آزمون فشار حلقه روی آلیاژ Ti-6Al-4V با روان‌کاری شیشه انجام پذیرفت. در شکل5، تصاویر حلقه روان-کاری شده قبل و بعد از آزمایش حلقه مشاهده می‌شود. با توجه به نمودار آزمون فشار حلقه در شکل6، مشخص گردید که ضریب اصطکاک فرآیند برابر 0.3 می‌باشد. در تحلیل فرآیند از مدل اصطکاک برشی استفاده شده است.

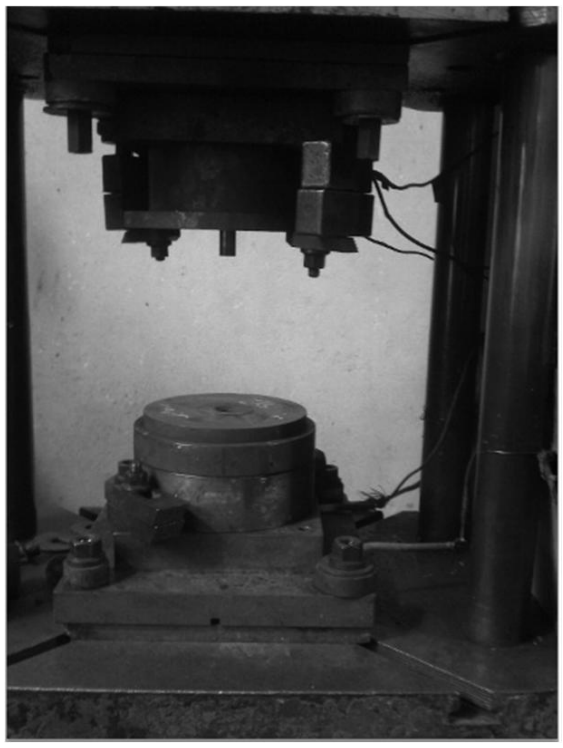


Fig. 4 Experimental setup

شکل 4 دستگاه پرس اکستروژن

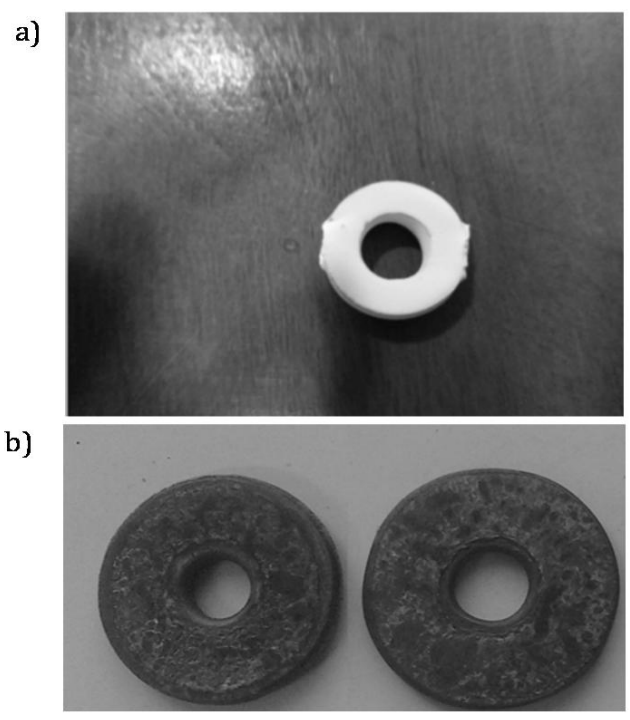


Fig. 5 lubricatedrings a) beforering test b) after ring test

شکل 5 حلقه روان‌کاری شده الف) قبل از آزمون حلقه ب) بعد از آزمون حلقه

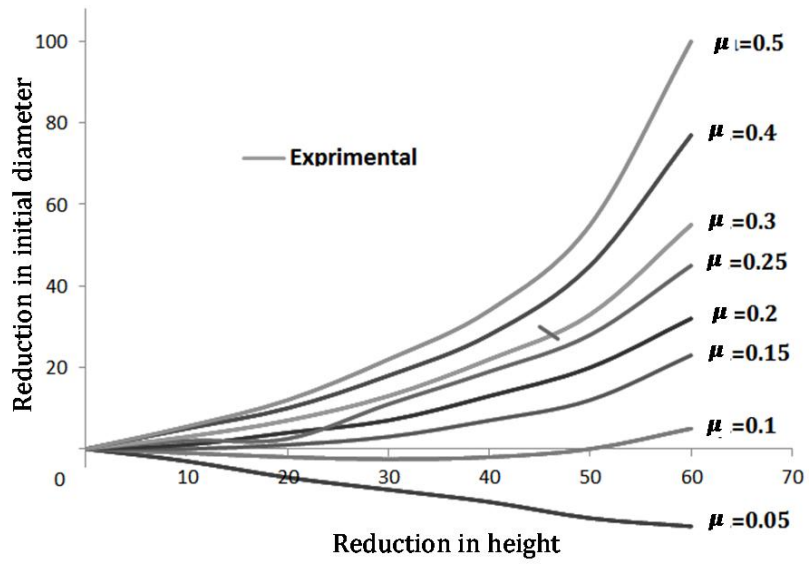


Fig. 6 the ring compression test of Ti-6Al-4V alloy obtained fromthe combination of simulation and experimental results

شکل 6 نمودار آزمون فشار حلقه آلیاژ Ti-6Al-4V حاصل از ترکیب نتایج آزمایش‌های شبیه‌سازی و تجربی

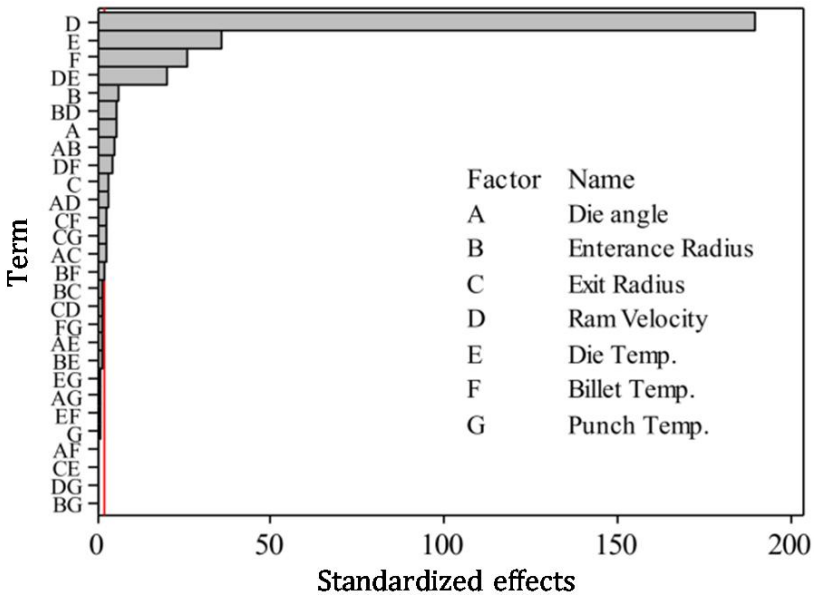


Fig. 7 Pareto chart of the standardized effects on extrusion force[1].

شکل 7 نمودار پارتو حاصل از آزمایش‌های شبیه‌سازی اثرات استاندارد پارامترهای مختلف روی نیروی اکستروژن [1].

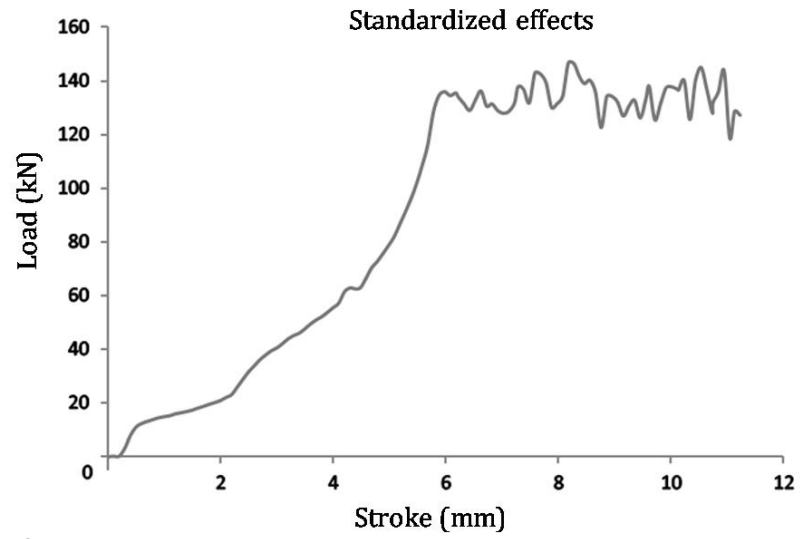


Fig. 8 The force required for blade preforms extrusion

شکل 8 نیروی اکستروژن در طی فرآیند شبیه‌سازی اکسترود پیش‌فرم پره آلیاژ Ti-6Al-4V

جدول 1 پارامترهای اتخاذ شده برای فرآیند

Table 1 process considered parameters

پارامتر	مقدار
ضریب انتقال حرارت بیلت	5(N/(s.mm°C))
ضریب اصطکاک	0/3
دمای اولیه بیلت	975 °C
دمای قالب	350 -500 °C
دمای سنبه	20 °C
سرعت سنبه	10 (mm/s)

همان‌طور که ذکر شد با توجه به روان‌کار استفاده شده در این پروژه، ضریب اصطکاک فرآیند برابر 0.3 می‌باشد؛ اما حائز اهمیت است که بدانیم در صورت تغییر روان‌کار، نیرو چه تغییری خواهد کرد. از این‌رو تغییرات نیرو به ازای تغییرات ضریب اصطکاک فرآیند مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور مجموعه شبیه‌سازی‌هایی برای نشان دادن تاثیر اصطکاک در فرآیند، با ثابت گرفتن همه متغیرها و متفاوت گرفتن ضریب اصطکاک (0.25، 0.3 ، 0.4 و 0.5) انجام پذیرفت. در جدول1 پارامترهای اتخاذ شده برای فرآیند مشاهده می‌شود.
لازم به‌ذکر است که ضریب انتقال حرارت بیلت از مرجع [11] استخراج شد.

3- تاثیر پارامترهای فرآیند روی نیروی فرآیند اکستروژن پیش‌فرم پره آلیاژ Ti-6Al-4V

با توجه به نمودار پارتو اثرات استاندارد شده در نیروی فرآیند اکستروژن آلیاژ Ti-6Al-4V ، که در شکل7 نشان داده شده است، می‌توان فهمید که سرعت رم، درجه حرارت قالب، درجه حرارت قطعه‌کار، شعاع پخ ورودی، زاویه قالب و شعاع پخ خروجی اثرات قابل توجهی روی نیروی اکستروژن دارند. سرعت رم بیشترین تاثیر را روی نیروی اکستروژن دارد. از طرفی می‌توان دریافت که اگرچه زاویه قالب، شعاع پخ ورودی و خروجی روی نیروی اکستروژن اثر دارند ولی اثر آن‌ها چندان قابل توجه نیست [1]. نتایج نشان می‌دهد که درجه حرارت سنبه تاثیر زیادی روی نیروی اکستروژن ندارد. در اکستروژن غیرهم-دما آلیاژ Ti-6Al-4V، به دلیل اختلاف دمای بین قطعه‌کارو قالب، پدیده سرد شدن قالب رخ می‌دهد. در مرحله انتقال بیلت از کوره به قالب، زمان انتقال بیشتر باعث اتلاف حرارت بیشتر بیلت شده و تنش جریان را نیز افزایش می-دهد. در اکستروژن آلیاژ Ti-6Al-4V شیشه که به‌عنوان روان‌کار به سطح قطعه‌کار اعمال می‌شود، به‌عنوان یک مانع حرارتی نیز عمل کرده و پدیده سرد شدن قالب را مخصوصا در زمان توقف، کمتر می‌کند [1].

4- نتایج و بحث

4-1- نتایج شبیه‌سازی‌ها

نیرو در طول فرآیند اکستروژن پیش فرم پره آلیاژ Ti-6Al-4V به پارامترهایی نظیر درجه حرارت اولیه بیلت، ضریب اصطکاک سطح، دمای قالب و ... بستگی دارد [1]. نیروی لازم جهت اکسترود پیش‌فرم پره در زمان انتقال 6 ثانیه (دمای اولیه بیلت 919 در شروع فرآیند) و ضریب اصطکاک 0.3 در شکل 8 مشاهده می‌شود. حداکثر نیروی فرآیند اکستروژن پیش‌فرم پره برابر 146.7 کیلونیوتن می‌باشد.

چهار مورد شبیه‌سازی فرآیند اکستروژن پیش‌فرم پره برای مشاهده تاثیر دمای قالب روی نیروی فرآیند انجام پذیرفت. در این شبیه‌سازی‌ها همه پارامترهای فرآیند به جز دمای قالب یکسان در نظر گرفته شد. شبیه‌سازی‌ها در چهار دمای 350، 400، 450 و 500 درجه سانتی‌گراد برای قالب انجام پذیرفت. در نمودار شکل 9 تغییرات نیروی فرآیند برحسب تغییرات دمای قالب مشاهده می‌شود. نتایج نشان داد که با افزایش دمای قالب، نیروی فرآیند نیز کاهش می‌یابد. شایان ذکر است که در عمل دمای قالب را نمی‌توان بیشتر از 500 درجه سانتی‌گراد درنظر گرفت، چون در دماهای بالاتر از 500 درجه سانتی‌گراد، قالب سختی خود را از دست می‌دهد و ممکن است در اثر شدت نیروهای وارده از طرف بیلت، تغییر فرم پیدا کند. در حالت کلی می‌توان گفت که دمای قالب روی نیروی فرآیند تاثیر دارد اما تاثیر آن به اندازه تاثیر زمان انتقال بیلت در نیروی فرآیند نمی‌باشد [1]. دلیل آن نیز به تاثیر بیشتر پارامتر زمان انتقال در دمای اولیه بیلت برمی‌گردد.

با کاهش زمان انتقال و جاگذاری بیلت از کوره به قالب، دمای بیلت در اثر مجاورت بیلت با هوای محیط، کاهش کمتری داشته و در نتیجه شکل‌دهی آن آسان‌تر می‌شود [1]. مطابق شکل 10 نیروی اکستروژن با افزایش زمان انتقال و جاگذاری از 2 ثانیه به 12 ثانیه، حدود 40 کیلونیوتن افزایش می‌یابد.

می‌توان گفت که زمان انتقال و جاگذاری بیلت از کوره به قالب، مهمترین پارامتر فرآیند اکستروژن پیش‌فرم پره Ti-6Al-4V می‌باشد زیرا مستقیما باعث تغییر دمای اولیه بیلت درست قبل از فرآیند اکستروژن می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که این انتقال بایستی در سریع‌ترین زمان ممکن انجام بگیرد تا فرآیند قابل انجام و بهینه باشد [1].

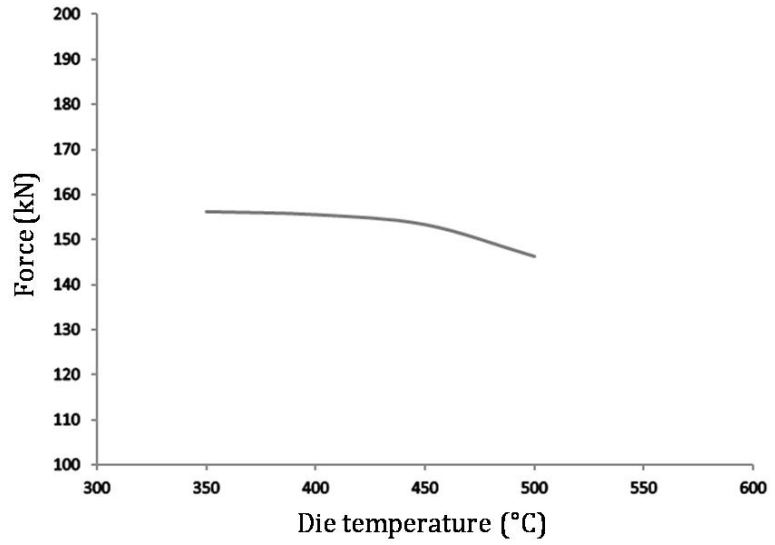


Fig. 9 Effect of die temperature on the extrusion force

شکل 9 تغییرات نیروی فرآیند نسبت به تغییر دمای قالب در طی آزمایش‌های شبیه‌سازی شده اکستروژن پیش‌فرم پره

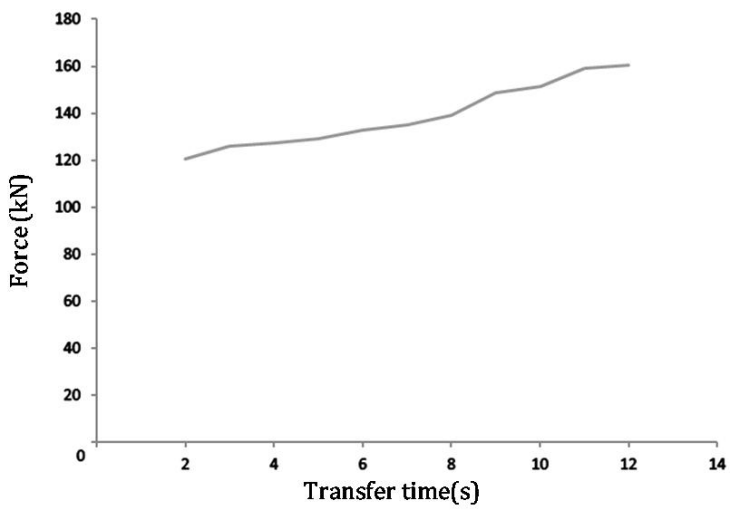


Fig. 10 Placing and transfer time effect in the process

شکل 10 تغییرات نیروی فرآیند با افزایش زمان انتقال در طی آزمایش‌های شبیه‌سازی شده اکستروژن پیش‌فرم پره

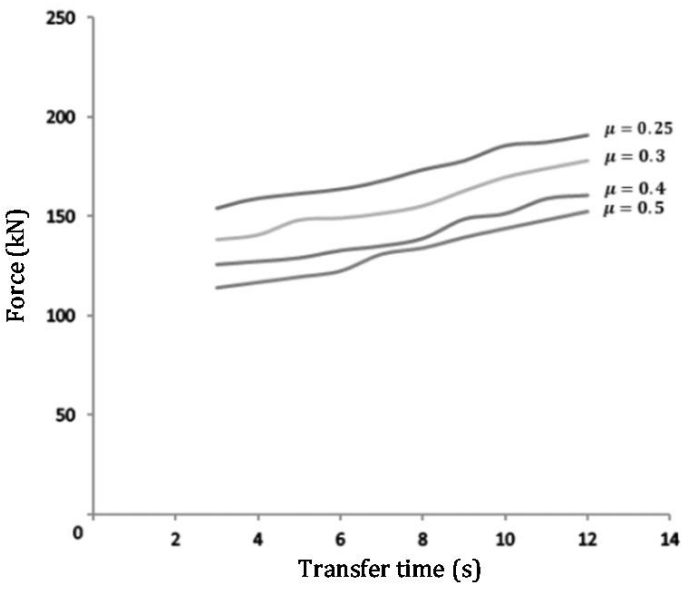


Fig.11friction effect of in force of blades preform extrusion simulation process

شکل 11 تاثیر اصطکاک در نیروی فرآیند اکستروژن پیش‌فرم پره در آزمایش‌های شبیه‌سازی شده

Fig. 12 Preform of successful extruded in die with temperatures 475, 450, 425, 400℃, from the left respectively

شکل 12 قطعات اکسترو شده با دمای قالب متفاوت- دمای قالب به ترتیب از سمت چپ 475 ، 450 ، 425 و 400

مجموعه شبیه‌سازی‌هایی برای نشان دادن تاثیر اصطکاک در فرآیند، با ثابت گرفتن همه متغیرها و متفاوت گرفتن ضریب اصطکاک انجام پذیرفت. در شکل11 تغییرات نیروی فرآیند به ازای چهار ضریب اصطکاک مختلف (0.25، 0.3 ، 0.4 و 0.5) مشاهده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش ضریب اصطکاک، نیروی لازم جهت اکسترود کردن پیش‌فرم پره آلیاژ Ti-6Al-4V نیز افزایش می‌یابد [4]. همچنین مشاهده شد که نیروی فرآیند در ضریب اصطکاک 0.25 حدود 40 کیلونیوتن کمتر از نیروی فرآیند در ضریب اصطکاک 0.5 می‌باشد. بنابراین هرچقدر بتوان ضریب اصطکاک فرآیند را با استفاده از روان‌کار مناسب کاهش داد، فرآیند بهینه‌تر و به‌صرفه‌تر قابل انجام می‌باشد.

4-2- صحه‌گذاری با نتایج تجربی

در این پروژه، آزمایش‌های موفق تحت تناژ پرس کمتر از 20 تن (معادل 196 کیلونیوتن) انجام پذیرفت؛ در حالی که در آزمایش‌های ناموفق، تناژ پرس تا 40 تن (معادل 392 کیلونیوتن) نیز بالا می‌رفت ولی بیلت به دلیل سرد شدن بیش از حد، اکسترود نمی‌شد.

در آزمون‌های تجربی مشاهده شد که فرآیند انتقال بیلت تاثیر بسزایی در انجام یا عدم انجام فرآیند اکستروژن دارد؛ به‌طوری که فقط در زمان‌های انتقال کمتر از 6 ثانیه، فرآیند اکستروژن انجام می‌شود. در زمان‌های انتقال بیش از 6 ثانیه، تناژ پرس تا 40 تن افزایش می‌یافت ولی پیش‌روی سنبه متوقف می‌شد و فرآیند اکستروژن انجام نمی‌پذیرفت. در آزمایش‌های تجربی، انتقال بیلت از کوره به قالب حساس‌ترین و سخت‌ترین مرحله فرآیند اکستروژن پیش‌فرم پره می‌باشد.

آزمایش‌های تجربی در 7 دمای مختلف برای قالب، شامل دماهای 350 ، 375 ، 400 ، 425 ، 450 ، 475 و 500 درجه سانتی‌گراد، انجام پذیرفت. نتایج نشان داد که دمای قالب تاثیر کمی روی نیروی مورد نیاز فرآیند اکستروژن پیش‌فرم پره دارد [1]؛ بطوری‌که که فرآیند اکستروژن در زمان‌های انتقال کمتر از 6 ثانیه و قالب با دمای بیش از 300 درجه سانتی‌گراد، قابل انجام بود در حالی که فرآیند در زمان‌های انتقال بیش از 6 ثانیه و به ازای هر دمای قالب، قابل اجرا نبود. بنابراین نتیجه گرفته شد که در رابطه با کاهش دمای بیلت، تاثیرات زمان انتقال بسیار با اهمیت‌تر از تاثیرات دمای قالب می‌باشد و در واقع مرحله انتقال بیلت کل فرآیند را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در شکل‌های 12 و 13 به ترتیب قطعات اکسترود شده موفق و ناموفق تحت دماهای مختلف قالب مشاهده می‌شود. در شکل12 مشاهده می‌شود که چهار پیش‌فرم مختلف در قالب با دماهای 400 ، 425 ، 450 و 475 اکسترود شده‌اند.

Fig. 13 unsuccessful preforms that produced in die with temperatures of 375, 400,425,500℃, from the left respectively.

شکل 13 قطعات ناموفق با دمای قالب متفاوت- دمای قالب به ترتیب از سمت چپ 375 ، 400 ، 425 و 500

وجه مشترک قطعات تولید شده در این شکل، زمان انتقال مناسب 5 الی 6 ثانیه می‌باشد. در شکل 13 نیز قطعاتی که به دلیل سرد شدن بیلت در اثر بالا بودن زمان انتقال، اکسترود نشدند، مشاهده می‌شود. این قطعات درون قالب‌هایی با دماهای متفاوت 375 ، 400 و 500 حاصل شده‌اند.

حداکثر نیروی فرآیند در شبیه‌سازی با زمان انتقال بیلت در 6 ثانیه برابر 146.7 کیلونیوتن می‌باشد. در آزمون‌ها تجربی از نشانگر تناژ خود پرس برای مشاهده نیروی فرآیند استفاده شد. طبق مشاهدات انجام گرفته در هنگام آزمون‌های تجربی اکستروژن پیش‌فرم پره آلیاژ Ti-6Al-4V، تناژ پرس حداکثر تا مقادیر بین 147 الی 196 کیلونیوتن (15 الی20 تن) قرار می‌گرفت. از آن‌جا که حداکثر نیروی اکستروژن در آزمایش‌های تجربی، در بازه 147 الی 196 کیلونیوتن دارای نوسان بود، از این رو می‌توان گفت که حداکثر نیروی فرآیند به طور متوسط برابر 171 کیلونیوتن (میانگین بازه) می‌باشد. از طرفی چون حداکثر نیروی فرآیند در آزمایش‌های شبیه‌سازی شده برابر 146.7 کیلونیوتن بود؛ می‌توان نتیجه گرفت که خطای مدل کمتر از 14.2 درصد می‌باشد.

در نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها مشاهده شد که با تغییر دمای قالب از 350 تا 500 درجه سانتی‌گراد، نیروی فرآیند اکستروژن پیش‌فرم پره حدود 10 کیلو نیوتن کاهش می‌یابد، که در این فرآیند این تغییر نیرو قابل توجه نمی‌باشد.

در آزمایش‌های تجربی مشاهده شد که فرآیند در زمان انتقال کمتر از 6 ثانیه و تحت هر دمای قالب (هر دمایی در محدوده دمایی 350 الی 500 درجه سانتی‌گراد) انجام می‌پذیرد و در زمان‌های انتقال بیش از 6 ثانیه و به‌ازای هر دمای قالب، فرآیند انجام نمی‌پذیرد. این نشان می‌دهد که نیرو کمتر تحت تاثیر دمای قالب می‌باشد و بیشتر تحت تاثیر زمان انتقال می‌باشد. به‌عبارتی دیگر، در آزمایش‌های تجربی نیز همانند آزمایش‌های شبیه‌سازی ثابت شد که تاثیر دمای قالب در تغییرات نیرو قابل توجه نمی‌باشد.

5- نتیجه‌گیری

نرم‌افزار المان محدود سه‌بعدی "دفرم" برای توصیف رفتار تغییرشکل پلاستیک قطعه‌کار Ti-6Al-4V در طی فرآیند اکستروژن پیش‌فرم پره استفاده شده است. تحت شرایط اکستروژن مختلف، بررسی آنالیز عددی پارامتر نیروی فرآیند در طی فرآیند اکستروژن ارائه شده است. اثرات نسبی دمای بیلت، ضریب اصطکاک و دمای قالب مورد بررسی قرار گرفت. همچنین آزمایش تولید پیش‌فرم پره Ti-6Al-4V توسط فرآیند اکستروژن با موفقیت انجام پذیرفت، می‌توان نتایج حاصل را بصورت زیر جمع‌بندی کرد:

1) هرچه زمان انتقال بیلت از کوره به قالب بیشتر باشد دمای بیلت با کاهش بیشتری مواجه می‌شود.

2) حداکثر نیروی لازم جهت اکسترود پیش‌فرم پره برابر 146.7 کیلونیوتن می‌باشد.

3) با افزایش دمای قالب، نیروی فرآیند کاهش می‌یابد. تغییرات نیرو در قالب با دمای 350 درجه‌سانتی‌گراد نسبت به دمای 500 درجه‌سانتی‌گراد، کم و درحد 10 کیلونیوتن می‌باشد.

4) نیروی اکستروژن با افزایش زمان انتقال و جاگذاری از 2 ثانیه به 12 ثانیه، حدود 40 کیلونیوتن افزایش می‌یابد.

5) در عمل فرآیند اکستروژن برای تولید پیش‌فرم پره با زمان انتقال بیش از 6 ثانیه قابل انجام نمی‌باشد.

6) با افزایش ضریب اصطکاک، نیروی لازم جهت اکستروژن پیش‌فرم پره آلیاژ Ti-6Al-4V نیز افزایش می‌یابد. به‌طوریکه نیروی فرآیند در ضریب اصطکاک 0.25 حدود 40 کیلونیوتن کمتر از نیروی فرآیند در ضریب اصطکاک 0.5 می‌باشد.

6- مراجع

[1] S. J. Mirahmadi, M. Hamedi, Numerical and experimental investigation of process parameters in non-isothermal forward extrusion of Ti6Al4V, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol 75, pp. 33-44, 2014.

[2] S. Enayati, S. A. A. Akbari Mousavi, S. M. Ebrahimi, M. Belbasi, M. Sultan Bayazidi, Effects of temperature and effective strain on the flow behavior of Ti–6Al–4V, *Journal of the Franklin Institute*, Vol. 348, pp. 2813–2822, 2011.

[3] H. Ou and R. Balendra, Preform design for forging of aerofoil sections using FE simulation , *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 81, pp. 144–148, 1998.

[4] L. X. Li, D. S. Peng, J. A. Liu, Z. Q. Liu, and Y. Jiang, An experimental study of the lubrication behavior of A5 glass lubricant by means of the ring compression test, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 102, pp. 138–142, 2000.

[5] T. Seshacharyulu, S. C. Medeiros, W. G. Frazier, and Y. V. R. K. Prasad, Unstable flow during supratransus working of Ti – 6Al – 4V ,*Materials Letters,* Vol. 47, pp. 133–139, 2001.

[6] L. X. Li, K. P. Rao, Y. Lou and D. S. Peng, A study on hot extrusion of Ti–6Al–4V using simulations and experiments , *International Journal of Mechanical Sciences,* Vol. 44, pp. 2415–2425, 2002.

[7] R. B.-C. M.-R. Venturini, Hot Extrusion Experiments Performed On Ti-6al-4v For The Production Of Special Cros*, International Journal of Mechanical Sciences,* Vol. 21, No. 2, 2003.

[8] D. Damodaran and R. Shivpuri, Prediction and control of part distortion during the hot extrusion of titanium alloys, *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 150, pp. 70–75, 2004.

[9] S.Bruschi, S.Poggio, Workability of Ti–6Al–4V alloy at high temperatures and strain rates, *Journal of Materials Processing Technology ,* Vol. 58, p. 3622-3629, 2004.

[10] S. Zherebtsov, A. Mazur, G. Salishchev and W. Lojkowski, Effect of hydrostatic extrusion at 600 – 700 ◦ C on the structure and properties of Ti – 6Al – 4V alloy*, Materials Science and Engineering,* Vol. 485, pp. 39–45, 2008.

[11] V. Alimirzaloo, F. R. Biglari and . M. H. Sadeghi, Numerical and experimental investigation of preform design for hot forging of an aerofoil blade, *Journal Engineering Manufacture,* Vol. 225, Part B, pp. 1129–1139, 2010.