



اثر شکل هندسی قالب اکستروژن در تولید یک قطعه تقارن محوری آلومینیومی با ضخامت دیواره متفاوت

مهدی ظهور^{1*}، ابوالفضل کاظمی نسب²، محمد شهابی زاده³

1- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

3- کارشناس ارشد، مهندسی شکل‌دهی فلزات، جامعه قالیسازان ایران، تهران

* تهران، صندوق پستی 19395-1999، mzohoor@kntu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 12 تیر 1395

پذیرش: 10 شهریور 1395

ارائه در سایت: 24 مهر 1395

کلید واژگان:

شبیه‌سازی المان محدود

سرعت سیلان ماده

طول بیرینگ

محفظه تغذیه

تولرانس ابعادی

چکیده

در این مقاله، تأثیر شکل هندسی قالب در فرایند اکستروژن مستقیم روی تolerانس ابعادی سطح مقطع یک قطعه بررسی شده و سرعت اکستروژن، جریان فلز، دمای اکستروژن و نیروی اکستروژن، به عنوان متغیرهای فرایند به‌صورت تجربی و عددی مورد مطالعه قرار گرفتند. قطعه کار مورد آزمایش از جنس آلیاژ آلومینیوم 2014 با ضخامت دیواره متفاوت می‌باشد. این تفاوت در ضخامت دیواره موجب تغییرات در سرعت سیلان ماده هنگام خروج از قالب می‌شود. در نتیجه قالبی که برای تولید این قطعه استفاده می‌شود، باید قادر به کنترل نرخ جریان فلز باشد. در این مطالعه، از دو قالب مختلف برای تولید این قطعه استفاده شده است. در قالب اول برای کنترل سرعت فلز از روش ایجاد طول بیرینگ متغیر و در قالب دوم علاوه بر طول بیرینگ از تغذیه کننده نیز در کانال‌های باریک‌تر بهره برده شده است. از نتایجی که در آنالیز تجربی و عددی بر روی قالب اول به‌دست آمد، می‌توان نتیجه گرفت که این قالب کارایی لازم را برای تولید این قطعه ندارد. زیرا قادر به یکسان نمودن جریان ماده در تمام سطح مقطع قطعه نیست. به همین دلیل مشکلاتی از جمله کیفیت پایین همراه با عدم دقت لازم در ابعاد قطعه تولید شده، مخصوصاً در مقطع‌های باریک‌تر (به علت پر نشدن گوشه‌های قالب) وجود دارد. نتایج حاصل از آنالیز عددی قالب دوم نشان می‌دهد که کارایی قالب دوم بسیار بهتر از قالب اول بوده و توانسته سرعت سیلان ماده را در کل سطح مقطع قطعه کار تقریباً برابر کند و موجب بهبود دقت ابعادی در محصول شود.

Influence of extrusion die geometry in the manufacturing of an axisymmetric aluminium part with different wall thickness

Mehdi Zohoor^{1*}, Abolfazl Kazeminasab¹, Mohammad Shahabizadeh²

1- Faculty of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

2- Iranian Society of Toolmakers, Tehran, Iran

* P.O.B. 19395-1999, Tehran, Iran, mzohoor@kntu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 02 July 2016
Accepted 31 August 2016
Available Online 15 October 2016

Keywords:
Finite Element Simulation
Metal Flow Rate
Bearing Length
Feeder
Dimensional Tolerance

ABSTRACT

In this paper, the effect of extrusion die profile on the dimensional tolerance of a cross section of a part in a forward extrusion process was studied. In these experimental and numerical investigations, some parameters such as extrusion speed, metal flow, extrusion temperature and extrusion force were considered as process variables. The specimen was aluminium alloy 2014 with a variable wall thickness. The variable wall thickness causes the metal flow rate to be changed along the die orifice. As a result, the die which is used to produce this part must be suitable to control the flow rate of metal. In this study, two different dies were used to produce this part. In the first die, to control the metal flow, variable bearing length method is used. In the second die, in addition to the bearing length method, a feeder is used in the narrow channels. From the experimental and numerical results, it was found that the first die is not good enough for manufacturing of this part. Because, the first die was not able to control uniform metal flow rate through the die orifice during the extrusion process. This drawback causes the die cavity to remain empty at the sharp corners which results in a low quality and low dimensional accuracy in the product, especially in narrow channels. The numerical analysis results have shown that, the second die performance was much better than the first one. It was able to control uniform metal flow rate which causes high quality products.

1- مقدمه

به نام بیلِت¹، تحت فشار قرار می‌گیرد تا از میان سطح مقطع یک قالب که کوچکتر از بیلِت اولیه است سیلان پیدا کند. این فرایند که اساساً یک فرایند

اکستروژن یک فرایند تغییر شکل پلاستیک است، که در آن یک قطعه فلزی

¹ Billet

ماده هستند، بسیار آسان تر است [2]. در نتیجه در سال های اخیر استفاده از قالب های پاکت دار یا قالب های دارای محفظه تغذیه برای اکستروژن کردن مقاطع پیچیده به شکل چشم گیری افزایش یافته است.

در این مقاله بررسی تجربی و آنالیز عددی فرایند اکستروژن مستقیم یک قطعه متقارن محور آلومینیومی از جنس AA2014-T6 مورد بررسی قرار گرفته است. از آنجا که این قطعه در صنایع هوافضا به کار می رود و قطعات مورد استفاده در صنعت هوافضا باید دارای استحکام و مقاومت بالا و همچنین چقرمگی و مقاومت به شکست مناسبی باشند، لذا در این آزمایش از بیلتی با این جنس که تقریباً دارای این ویژگی ها است استفاده شده است. آلیاژهای سری 2000 آلومینیوم به طور عمده در صنایع هوافضا و برای تولید قطعات با استحکام بالا استفاده می شوند. این آلیاژها به علت استحکام بالا، اکستروپذیری نسبتاً سخت و قابلیت جوش پایی دارند. به همین منظور برای اکستروژن کردن این آلیاژها می بایست آنها را تا دماهای بالای درجه حرارت تبلور مجدد پیش گرم نمود (اکستروژن داغ)¹⁰ تا بتوان شکل پذیری این آلیاژها را افزایش داد [4,1]. از دیگر مزایای اکستروژن داغ این است که در هنگام شکل دهی، بازیابی همراه با تغییر شکل در قطعه اتفاق می افتد و پدیده کرنش سختی¹¹ تقریباً از بین می رود [5]. پروفیل مورد آزمایش در این مطالعه دارای یک مقطع با ضخامت دیواره های متفاوت است. به طوری که مقطع آن دارای یک بخش بزرگ در مرکز و چهار بخش یکسان و کوچکتر در اطراف می باشد. به همین دلیل طبیعتاً هنگام اکستروژن کردن آن شاهد تغییرات سرعت هنگام سیلان ماده خواهیم بود. برای کنترل سرعت سیلان ماده در این مطالعه از دو قالب با شکل هندسی متفاوت استفاده شده است. در قالب اول برای یکنواخت کردن سرعت سیلان ماده هنگام خروج از قالب فقط از تغییرات طول بیرینگ مطابق با شکل پروفیل در آن مقطع استفاده شده است. از نتایج به دست آمده از آزمایش تجربی و آنالیز عددی روی این قالب مشخص گردید که سطح تماس قالب نناسته سرعت سیلان ماده را هنگام خروج از قالب در کل مقطع، یکنواخت و متعادل نماید. همین امر موجب سرعت بیشتر مواد در مرکز قالب نسبت به اطراف شده و منجر به ایجاد تنش کششی در مواد اطراف مرکز می شود. در نتیجه تمایل مواد برای جریان یافتن به سمت مرکز افزایش یافته و همین امر موجب پر نشدن کامل قالب در قسمت های اطراف مقطع می شود. نتایج حاصل شده از اندازه گیری ابعاد قطعه تولیدی در هر دو حالت، صحت این مسئله را به وضوح نشان می دهد. در قالب دوم برای کنترل سرعت سیلان ماده، از کاربرد تغذیه کننده در مقاطع نازکتر به همراه طول بیرینگ متغیر به طور همزمان در قالب استفاده شده است. به دلیل مطابقت کامل نتایج شبیه سازی و تجربی در قالب اول، در قالب دوم فقط بررسی عددی روی فرایند صورت گرفته است. نتایج به دست آمده از شبیه سازی فرایند در این قالب نشان می دهد که سرعت ماده هنگام خروج از قالب به صورت چشمگیری در همه جای مقطع تقریباً یکنواخت شده و مشکل پر نشدن قالب نیز به طور کامل برطرف گردیده است. اعداد به دست آمده از اندازه گیری ابعاد قطعه اکستروژنی نیز کاملاً گویای بهبود بخش بودن قالب دوم می باشند. برای شبیه سازی فرایند اکستروژن در این مطالعه از نرم افزار سه بعدی دیفرم¹² استفاده شده است. به دلیل اینکه این نرم افزار قابلیت اندازه گیری دقیق ابعاد قطعه اکستروژن شده را ندارد، می بایست پس از پایان شبیه سازی قطعه اکستروژن شده را به نرم

فشاری معکوس است، توسط واکنش بیلت با محفظه¹ و قالب²، منجر به تولید تنش های فشاری بالایی شده که در کاهش ترک خوردن بیلت هنگام تغییر شکل اولیه اش موثر می باشد [1]. از این فرایند عمدتاً برای تولید قطعات با سطح مقطع های یکسان و در طول های بلند مطابق با شکل و طرح قالب استفاده می کنند.

طراحی و ساخت قالب مهم ترین نیاز تمام فرایندهای اکستروژن است. طراحی قالب تحت تاثیر برخی عوامل همچون نوع پرس، نوع مقطع و تolerانس های آن و مشخصات آلیاژ قرار دارد [1]. در این فرایند چون فلز از طریق قالب جریان می یابد و شکل و ابعاد آن را به خود می گیرد. در نتیجه کیفیت ابعاد به دست آمده، بهره وری و نرخ ضایعات به طور چشمگیری به عملکرد قالب بستگی دارد [2].

از مهمترین ویژگی های یک قالب اکستروژن این است که بتواند سرعت ماده را هنگام خروج از قالب کنترل کند به طوری که ماده در کل مقطع دارای یک سرعت باشد. اگر سرعت ماده هنگام خروج از قالب به طور کامل یکسان نباشد، قطعه اکستروژن شده ممکن است دچار خمیدگی³، پیچیدگی⁴ و یا عدم تolerانس ابعادی⁵ شود که این مسئله زمانی که ضخامت دیواره های شکل اکستروژنی کوچک باشد، بیشتر اتفاق می افتد [3,2]. تغییرات در سرعت ماده توسط دو عامل اصطکاک و ضخامت دیواره های مقطع پروفیل ایجاد می شود. به طوری که سرعت در دیواره های کلفت تر و مناطق نزدیک به مرکز قالب به دلیل سطح مقطع بزرگتر و وجود اصطکاک بین سطح بیلت و محفظه نسبت به دیواره های نازکتر و مناطق نزدیک دیواره های محفظه بیشتر است [3].

برای کنترل سرعت ماده می توان به طور سنتی از تغییرات در طول سطح تماس قالب (بیرینگ)⁶ با سطح فلز بهره برد. طول بیرینگ با ایجاد نیروی اصطکاک سرعت ماده را متعادل می نماید. اما این روش به دلیل ایجاد حرارت ناشی از اصطکاک در سطح تماس موجب افزایش دمای اکستروژن شده و دسترسی به سرعت های بالا را محدود می نماید. همچنین موجب کاهش کیفیت سطح و سخت شدگی موضعی قطعه اکستروژنی و کاهش طول عمر قالب می شود. به همین دلیل همواره سعی بر آن است که تا حد امکان طول سطح تماس قالب با قطعه را کاهش داد [3,2]. در نتیجه امروزه برای رسیدن به این هدف و همچنین کنترل جریان ماده از تغذیه کننده⁷ یا پاکت⁸ در مقابل سطح قالب استفاده می کنند. وجود تغذیه کننده یا پاکت در قالب موجب کاهش فشار اکستروژن شده و از سطح تماس قالب محافظت می نماید. همچنین می توان از این قالب ها به علت باقی ماندن فلز در آنها از بیلت قبلی و جوش خوردن به بیلت بعدی در اکستروژن پشت سر هم بیلت ها⁹ و برای تولید قطعات با طول بلند استفاده نمود [3]. در قالب های دارای محفظه تغذیه فلز قبل از ورود به سطح بیرینگ دچار تغییر شکل اولیه شده و سرعت آن کنترل می شود. طراح قالب می تواند با ایجاد تغییر در حجم، موقعیت، عمق و زاویه ورودی محفظه تغذیه سرعت ماده خروجی از قالب را یکنواخت نماید. ساخت و اصلاح این قالب ها به خصوص برای تولید شکل های با دیواره نازک در مقایسه با قالب هایی که فقط دارای طول بیرینگ برای کنترل سرعت

¹ Container

² Die

³ Bent

⁴ Twist

⁵ Out of Tolerance

⁶ Bearing

⁷ Feeder

⁸ Pocket

⁹ Billet to Billet

¹⁰ Hot Extrusion

¹¹ Strain Hardening

¹² Deform 3d

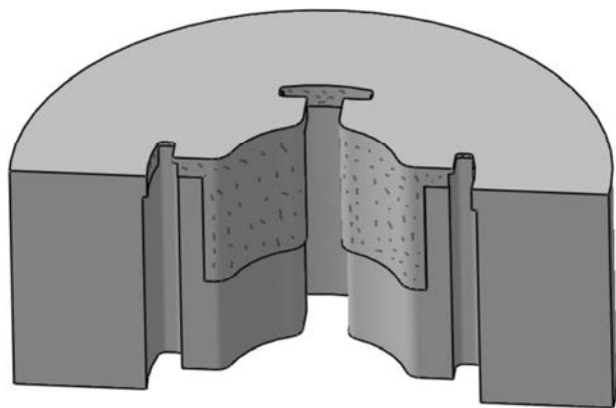


Fig. 2 Front view of the die with variable bearing length

شکل 2 نمایی از قالب دارای طول بیرینگ متغیر

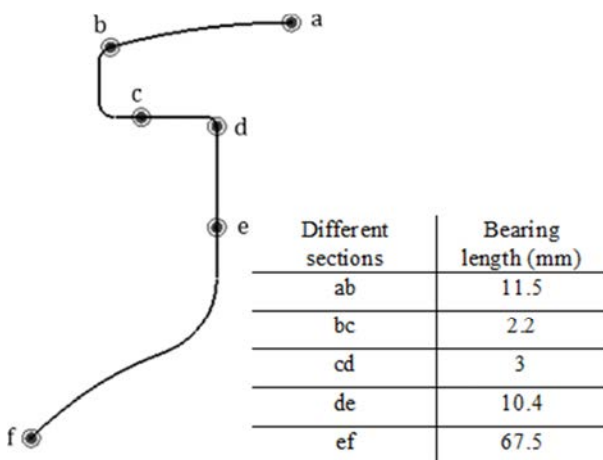


Fig. 3 Bearing length in different sections of the first die

شکل 3 طول بیرینگ در بخش های مختلف قالب اول

طول سطح تماس در هر موضع از دریچه قالب به اندازه‌ای که در مقابل سیلان فلز در آن موضع باید مقاومت شود، وابسته است. در فرایند اکستروژن مستقیم، مقاومت اصطکاکی در فصل مشترک بیلت و محفظه، سیلان فلز نزدیک به سطح بیلت را کند می‌نماید. لذا مرکز بیلت سریع‌تر از محیط اطراف آن حرکت می‌کند. برای موازنه سیلان، طول سطح تماس قالب باید نسبت عکس با فاصله آن از مرکز بیلت داشته باشد. در مقاطع نازک‌تر به دلیل کوچک بودن دریچه قالب، سیلان کندتر می‌شود. به طور مشابه برای موازنه سیلان در مقاطع نازک‌تر طول سطح تماس قالب باید کوچک‌تر باشد و بالعکس [1]. فرایند اکستروژن بر روی این قالب در عمل نیز آزمایش شده است.

در قالب دوم برای کنترل سرعت سیلان ماده از روش ایجاد تغذیه کننده در مقاطع نازک‌تر به همراه طول بیرینگ با اندازه‌های متفاوت در سطح قالب استفاده شده است. شکل 4 نمایی از این قالب را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود در این قالب از دو محفظه تغذیه با اندازه‌های مختلف و عمق یکسان (60 mm)، در هر چهار طرف قطعه استفاده شده است. تغذیه کننده بزرگتر در قسمت تاج قطعه و به شکل مخروطی با زاویه 15 درجه و دارای فیلت² دیواره به اندازه 5 mm و تغذیه کننده کوچکتر در قسمت رابط بین تاج و قسمت مرکزی قطعه و به شکل مخروط با زاویه 5 درجه تعبیه شده است. در این قالب نیز همانند قالب اول از طول بیرینگ‌های مختلف مطابق

افزار کتیا¹ منتقل کرد و اندازه‌گیری دقیق ابعاد را در محیط این نرم افزار بدست آورد.

2- طراحی قالب

سطح مقطع قطعه‌ای که در این مطالعه قرار است اکستروژد شود به همراه اندازه‌های ابعاد آن بر روی حفره قالب در شکل 1 نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود این قطعه متقارن محور دارای ضخامت دیواره‌های مختلف در طول سطح مقطع است. به طوری که ضخامت دیواره در مرکز آن بسیار کلفت‌تر از اطراف آن بوده و همین امر موجب ایجاد اختلاف در سرعت سیلان ماده هنگام خروج از قالب می‌شود. در این مطالعه عملکرد شکل هندسی قالب در یکنواخت نمودن سرعت ماده هنگام خروج از قالب و تاثیر کنترل سرعت ماده روی کیفیت ابعادی قطعه، سرعت اکستروژن، جابجایی ماده، دمای اکستروژن و نیروی اکستروژن مورد بررسی قرار گرفته است. به همین دلیل برای تولید این پروفیل از دو قالب مختلف از لحاظ شکل ظاهری استفاده شده است. از دیگر پارامترهایی که می‌توانست در این آزمایش مورد مطالعه قرار گیرد و میزان تاثیرپذیری‌شان نسبت به هندسه قالب بررسی گردد، می‌توان به فشار اکستروژن، نسبت اکستروژن، تنش موثر، کرنش موثر و نرخ کرنش موثر اشاره نمود. هر چه نسبت اکستروژن در یک مقطع بالاتر باشد، دلیل واضحی بر کار مکانیکی بیشتر یا کرنش پلاستیکی بالاتر است. در نتیجه فشار اکستروژن مورد نیاز جهت حرکت دادن فلز از میان قالب بالاتر می‌رود که منجر به تنش بیشتر در آن نقاط می‌شود [1].

در قالب اول که در شکل 2 نشان داده شده است، برای یکنواخت نمودن سرعت سیلان ماده از روش تغییرات طول بیرینگ متناسب با شکل پروفیل در آن مقطع استفاده شده است. این روش که اساسا با ایجاد نمودن نیروی مقاوم اصطکاکی در برابر حرکت بیلت موجب کند نمودن سرعت فلز می‌شود، در بیشتر قالب‌های اکستروژن مورد استفاده قرار می‌گیرد. وظیفه سطح تماس قالب عبارت است از کنترل اندازه، شکل، سطح نهایی و سرعت اکستروژن [1]. به دلیل متقارن بودن مقطع پروفیل، شکل 3 اندازه طول بیرینگ در بخش‌های مختلف قالب را فقط برای 1/8 مدل نشان می‌دهد.

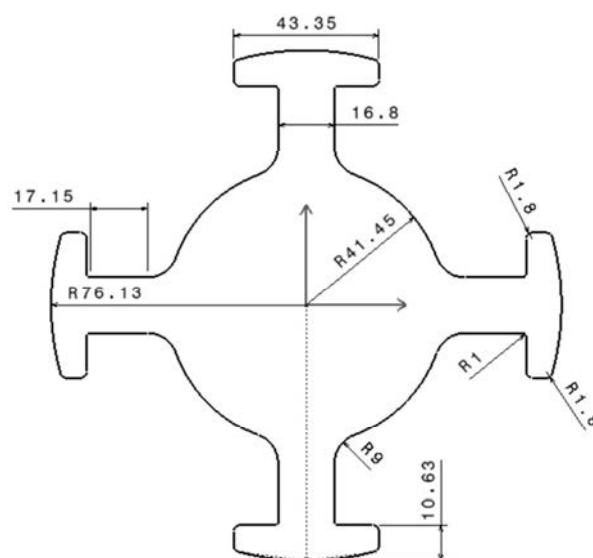


Fig. 1 Cross section and dimensions of the die cavity

شکل 1 سطح مقطع و ابعاد حفره قالب

² Fillet

¹ CATIA

در طول آنالیز از سیستم بازیابی مش¹ خودکار نیز جهت کنترل واپیچش المانها در بیلت و سطح بیرینگ استفاده شده است. برای شبیه سازی این فرایند جهت بالا نگه داشتن کیفیت مش و جلوگیری از اعوجاج المانها در طول آنالیز از فرمولاسیون اوپلر - لاگرانژ دلخواه² استفاده می شود. در این روش امکان حرکت مستقل مش و ماده وجود دارد، بنابراین حتی برای مدل هایی با تغییر شکل های بزرگ یا در مدل هایی که در آن بخشی از ماده از بین می رود، می توان با استفاده از این روش کیفیت مش بندی را حفظ نمود [7]. در طی شبیه سازی، بیلت شکل پذیر و سایر ابزارها (محفظه، قالب و سمبه) به صورت صلب فرض شده اند و رفتار تغییر شکل مواد به صورت صلب-ویسکوپلاستیک حرارتی³ در نظر گرفته شده است.

در این کار چون قصد بررسی ابعاد قطعه اکستروژد شده را به همراه سایر پارامترها داریم و به دلیل اینکه اندازه مش انتخابی بسیار در کیفیت لبه های نهایی ایجاد شده و زمان آنالیز موثر است، و از طرفی چون فرایند اکستروژن نیز بعد از یک حالت گذرا و تغییر شکل پذیر به یک سیکل حالت ثابت تبدیل می شود، برای به حداقل رساندن زمان آنالیز، شبیه سازی پس از رسیدن به یک حالت سیکل ثابت متوقف می شود. در این آنالیز اندازه مش 3 میلیمتری برای بیلت و از نوع تتراهدرال⁴ در نظر گرفته شده است. جنس بیلت مورد آزمایش AA2014-T6 و سایر ابزارها از جنس فولاد AISI-H13 می باشند. در جدول 1 دمای بیلت و سایر ابزارها حین آزمایش به همراه سایر شرایط فرایند آورده شده است. در این شبیه سازی از مدل اصطکاک برشی ترسکا⁵ برای بیان رفتار اصطکاکی بین بیلت با قالب و دیگر ابزارها استفاده شده است. طبق این مدل و معیار فون میز⁶ فاکتور اصطکاک طبق رابطه (1) محاسبه می شود. در این رابطه fs تنش برشی اصطکاکی، m فاکتور اصطکاک، τ استحکام تسلیم برشی ماده و σ تنش تسلیم موثر ماده می باشد. فاکتور اصطکاک مقداری بین $0 \leq m \leq 1$ دارد که اگر $m=0$ باشد یعنی لغزش کامل اتفاق می افتد و اگر $m=1$ شود چسبندگی کامل ایجاد می شود [8]. در این شبیه سازی فاکتور اصطکاک بین بیلت و سایر ابزارها برابر مقدار ثابت 0.4 فرض شده است.

$$fs = m\tau = m \frac{\sigma}{\sqrt{3}} \Rightarrow m = \frac{\sqrt{3} fs}{\sigma} \quad (1)$$

در این کار، چون مواد از مدل صلب-پلاستیک همگن⁷ پیروی می کنند، تنش جریان مطابق رابطه (2) تابعی از کرنش موثر، نرخ کرنش موثر و دما در

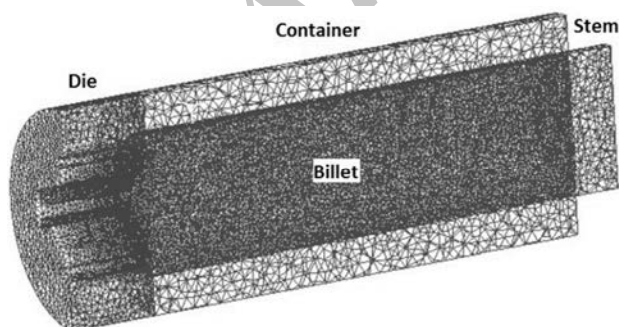


Fig. 6 A schematic illustration of the entire extrusion process system with mesh

شکل 6 شماتیکی از کل سیستم مش بندی شده فرایند اکستروژن

¹ Remeshing

² Arbitrary Lagrangian-Eulerian Method

³ Rigid-Viscoplastic Thermal

⁴ Tetrahedral Mesh

⁵ Tresca

⁶ Von Mises

⁷ Isotropic Rigid-Plastic

شکل 5 استفاده شده است. تغذیه کننده بزرگتر در محدوده ab و تغذیه کننده کوچکتر در محدوده bc قرار دارد. بخش cd که مربوط به قسمت مرکزی قطعه است فقط دارای بیرینگ به طول 70 mm می باشد. مزیت استفاده از تغذیه کننده مخروطی نسبت به مسطح در این است که منطقه مرده فلزی که در گوشه تغذیه کننده مسطح شکل می گرفت و باعث کند شدن سیلان ماده به دلیل تنش برشی می شد در تغذیه کننده مخروطی کاملاً حذف شده و در نتیجه سرعت سیلان بیشتری را در این قالبها خواهیم داشت [6].

3- روش شبیه سازی المان محدود و شرایط آزمایش

برای شبیه سازی این فرایند از نرم افزار سه بعدی دیفرم که نرم افزاری بر پایه المان محدود می باشد و برای شبیه سازی و آنالیز فرایندهای مختلف شکل دهی و عملیات حرارتی طراحی گردیده، استفاده شده است. شکل 6 نمایی از کل سیستم فرایند را به صورت مش بندی شده نمایش می دهد. مش بندی قالب و سایر ابزارها برای محاسبه تاثیرات حرارتی آنها با بیلت انجام می شود.

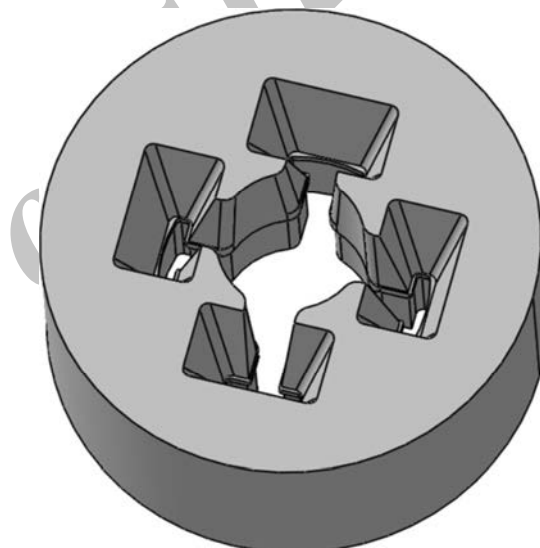


Fig. 4 Top view of the die with feeder in thinner sections and variable bearing length

شکل 4 نمایی از قالب دارای تغذیه کننده در مقاطع نازک تر به همراه طول بیرینگ متغیر

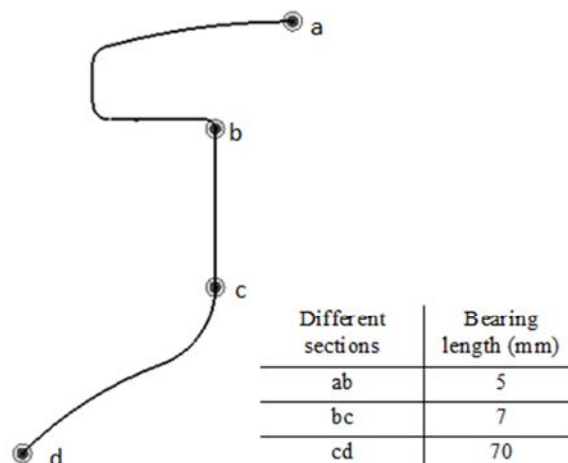


Fig. 5 Bearing length in different sections of the second die

شکل 5 طول بیرینگ در بخش های مختلف قالب دوم

نظر گرفته شده است [9].

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\epsilon}, \dot{\bar{\epsilon}}, T) \quad (2)$$

در رابطه (2)، $\bar{\sigma}$ تنش جریان موثر، $\bar{\epsilon}$ کرنش موثر، $\dot{\bar{\epsilon}}$ نرخ کرنش موثر و T دما قطعه کار می‌باشد. نرم افزار دیفرم که برای شبیه‌سازی این کار استفاده شده، دارای یک مکانیزم درونیایی است که این امکان را برای نرم‌افزار فراهم می‌کند تا بتواند مقادیر تنش و نرخ کرنش را از پایگاه اطلاعات استخراج نماید [7, 10, 11]. در جدول 2 خواص فیزیکی ماده قطعه کار و سایر ابزارها به همراه ضریب انتقال حرارت همرفتی و جابجایی آورده شده است [9].

4- بحث در نتایج

4-1- کنترل ابعاد قطعه اکستروژنی

همان‌طور که اشاره شد، هدف اصلی این مقاله کنترل ابعاد قطعه اکستروژن شده پس از پایان عمل شبیه‌سازی است. برای رسیدن به این هدف و به جهت اینکه امکان اندازه‌گیری دقیق ابعاد در نرم افزار سه بعدی دیفرم وجود ندارد، می‌بایست پس از پایان یافتن عمل شبیه‌سازی در هر دو قالب، قطعه کار اکستروژن شده را جهت اندازه‌گیری دقیق ابعاد به یک نرم‌افزار دیگر منتقل کرد. برای انجام این کار باید از بخش هندسی¹ نرم‌افزار دیفرم در محیط پیش پردازش² یک فایل با فرمت STL ایجاد کرد. سپس این فایل STL را به محیط ابرنقاط³ نرم افزار کتیا انتقال داده و اجرا کرد. در گام بعد با ایجاد

جدول 1 پارامترهای فرایند مورد استفاده در آنالیز تجربی و عددی

Table 1 The process parameters used in the experimental and numerical analysis

پارامترها	مقدار	واحد
دمای اولیه بیلت	420	(°C)
دمای اولیه محفظه	403	(°C)
دمای اولیه قالب	420	(°C)
دمای اولیه سمیه	403	(°C)
سرعت سمیه	2	(mm/sec)
نسبت اکستروژن	2.75	-
طول بیلت	600	(mm)
قطر بیلت	178	(mm)
فاکتور اصطکاک بین بیلت و سایر ابزارها	0.4	-

جدول 2 خواص فیزیکی قطعه کار و ابزارها

Table 2 The physical properties of the workpiece and tools

خواص فیزیکی	AA2014	H13 Tool steel
ظرفیت گرمایی [N/(mm ² °C)]	2.43	5.6
رسانندگی حرارتی [N/(sec °C)]	180.2	28.4
ضریب انتقال حرارت بین قطعه کار و سایر ابزارها [N/(sec mm °C)]	11	11
ضریب انتقال حرارت بین قطعه کار/ ابزارها و هوا [N/(sec mm °C)]	0.02	0.02

مقطع⁴ در جهت عمود بر طول قطعه اکستروژن شده یک سطح انتخاب شود. به علت مقایسه نتایج، مقطع‌ها با فاصله ثابتی از خروجی هر دو قالب ایجاد می‌شوند. پس از انتخاب مقطع‌ها، ابعاد آنها در محیط نقشه کشی⁵ نرم افزار کتیا قابل اندازه‌گیری است. همان‌طور که در شکل‌های 7 و 8 مشاهده می‌شود مقطع‌ها در هر دو قالب، به فاصله ثابت 160 میلی‌متر از ورودی قالب ایجاد شده‌اند. نتایج حاصل از اندازه‌گیری منحنی این دو مقطع در محیط نقشه‌کشی در شکل‌های 9 و 10 نشان داده شده است. برای اینکه یک معیار ثابت در طول اندازه‌گیری رعایت شود، اندازه‌ها در قسمت‌های مختلف شکل، در راستای خطوط شطرنجی و نقاط ثابت گرفته شده‌اند. همچنین جهت کسب نتایج دقیق‌تری از آنالیز، اندازه‌گیری در هر چهار طرف قطعه متقارن و در فواصل مختلف از ورودی قالب انجام شده است. در هر دو قالب، مقطع‌ها در فواصل 140، 160، 180، 200 از ورودی قالب ایجاد شده‌اند. اندازه‌گیری بر روی منحنی مقطع در پنج بخش طول تاج، عرض تاج، بخش رابط تاج و قسمت مرکزی، شعاع قسمت مرکزی و شعاع بزرگ قطعه صورت گرفته است. نتایج به‌دست آمده از مقایسه دو قالب نشان می‌دهد که بیشترین اختلاف در اندازه‌های حاصل شده در بخش طول تاج قطعه اتفاق افتاده است. در جدول 3، اندازه‌های به دست آمده از دو منحنی شکل 9 و 10، در بخش طول تاج قطعه و در چهار طرف به تفصیل آورده شده است. اختلاف به دست آمده بین این اندازه‌ها و اندازه حفره قالب نشان می‌دهد که قالب دارای طول ببرینگ در این بخش دچار کاهش اندازه‌های بیش از حد درصد انقباضی قابل قبول شده است. مقدار انقباض معمول مواد بسته به نوع آلیاژ بین 1 الی 1.25 درصد

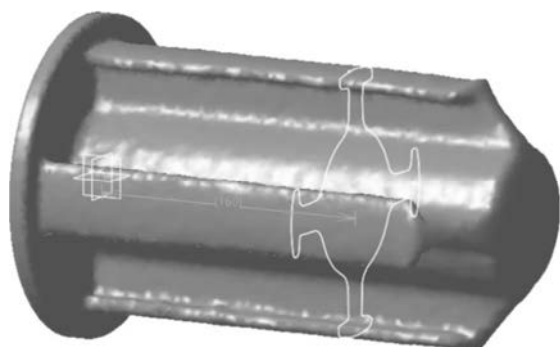


Fig. 7 The section in the product using first die

شکل 7 نمایش مقطع ایجاد شده در قطعه خروجی از قالب اول

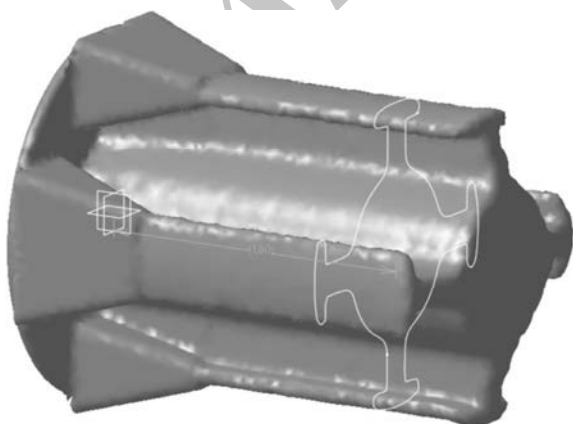


Fig. 8 The section in the product using second die

شکل 8 نمایش مقطع ایجاد شده در قطعه خروجی از قالب دوم

⁴ Section

⁵ Drafting

¹ Geometry

² Pre-Processor

³ Cloud of Points

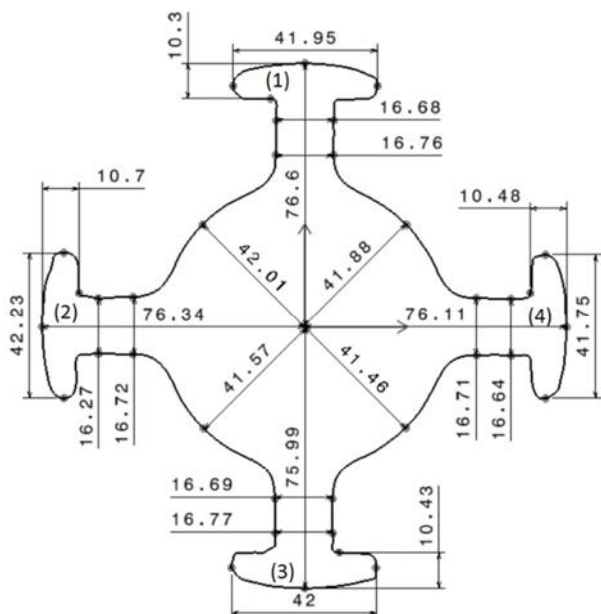


Fig. 10 Dimensions of the product obtained by second die

شکل 10 ابعاد قطعه تولید شده با قالب دوم

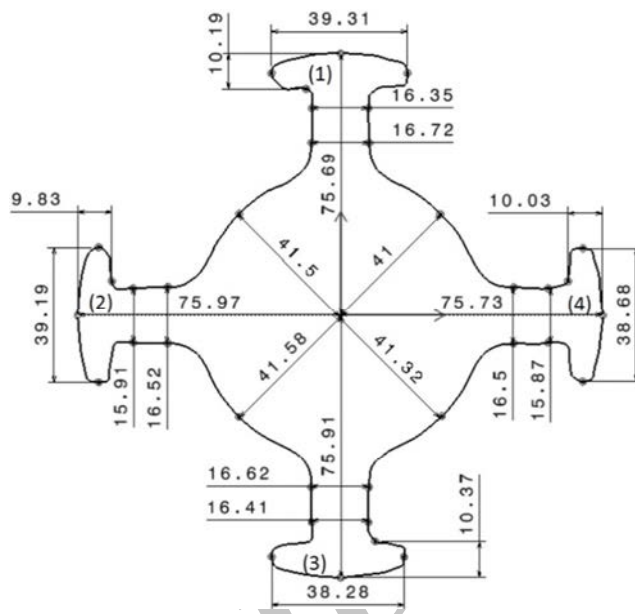


Fig. 9 Dimensions of the product obtained by first die

شکل 9 ابعاد قطعه تولید شده با قالب اول

پایان عمل اکستروژن در بخش‌های اولیه قطعه به صورت ترک خصوصا در بخش‌های تاج و رابط قطعه مشاهده شود. شکل 12 نمونه‌هایی از ترک ایجاد شده در بخش تاج قطعه را نشان می‌دهد. این عدم یکنواختی در سرعت و نیروی کششی به وجود آمده ناشی از آن می‌تواند موجب پر نشدن کافی قالب به خصوص در دیواره‌های نازک‌تر شود. پر نشدن کامل قالب نیز می‌تواند عوارضی همچون عدم کیفیت لبه‌های خارجی و خارج از تolerانس شدن ابعاد قطعه به دنبال داشته باشد. شکل‌های 13 و 14 وضعیت تماس بین بیلت و سطح قالب را در طول شبیه‌سازی نشان می‌دهند. همان‌طور که مشخص است در قالب اول، فقط در بخش مرکزی بین بیلت و قالب اندک تماسی وجود دارد که حاکی از پر نشدن قالب در کل بخش‌های آن است. اما در قالب دوم که دارای محفظه تغذیه و طول بیرینگ است، مشاهده می‌شود که قالب با

جدول 3 مقایسه داده‌های حاصل از دو منحنی در قسمت طول تاج

Table 3 Comparison of the results obtained from two parts profile along the crown length

اندازه	اختلاف	اختلاف	اندازه طول	اندازه طول	
حفره قالب	اندازه	اندازه	تاج در	تاج در	
در بخش	حفره قالب	حفره قالب	قالب دوم	قالب اول	
طول تاج	با (D_2)	با (D_1)	(D_2)	(D_1)	
(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	
43.35	1.14	4.04	41.95	39.31	بخش 1
43.35	1.12	4.16	42.23	39.19	بخش 2
43.35	1.35	5.07	42	38.28	بخش 3
43.35	1.60	4.67	41.75	38.68	بخش 4



Fig. 11 A view of the section created in part by using first die

شکل 11 نمایش مقطع ایجاد شده در قطعه توسط قالب اول

است [12]. در ادامه دلایل این اتفاق به تفصیل بیان می‌شود. شکل 11 مقطع ایجاد شده از قطعه اکستروژنی را در آزمایش عملی نشان می‌دهد. همانند آنالیز عددی در آزمایش تجربی نیز مقطع‌های ایجاد شده در فواصل مختلف مورد اندازه‌گیری قرار گرفته‌اند.

مقادیر ماکزیمم و مینیمم که از اندازه‌گیری ابعاد در بخش‌های مختلف قطعه به دست آمده در جدول 4 به صورت یک محدوده تغییرات آورده شده است. محدوده تغییرات در بخش‌های مختلف قطعه، نسبت به اندازه‌ای که طبق نقشه اصلی پس از انجام ماشینکاری می‌بایست در قطعه ایجاد شود، در قالبی که دارای محفظه تغذیه و طول بیرینگ است کاملاً راضی کننده می‌باشد و در قالبی که فقط دارای طول بیرینگ می‌باشد هم در عمل و هم در شبیه‌سازی رضایت چندانی وجود ندارد. به طور کلی نتایج به دست آمده از قالب اول بیانگر این مطلب است که این قالب عملکرد چندانی موفقی در کنترل سرعت سیلان ماده هنگام خروج از قالب ندارد. همان‌طور که در شکل 7 مشاهده گردید، قسمت مرکزی قطعه به دلیل داشتن سطح مقطع بزرگتر نسبت به سایر قسمت‌ها دارای سرعت بیشتری می‌باشد. همین امر موجب ایجاد یک تنش کششی در بخش رابط و تاج قطعه شده که منجر به تنش پسماند کششی در آن بخش‌ها می‌شود. این تنش پسماند می‌تواند پس از

جدول 4 مقایسه دامنه تغییرات ابعاد قطعه تولید شده توسط دو قالب با نتایج عملی و نقشه مهندسی محصول

Table 4 Comparison of the range of dimensional changes in the product obtained by using two dies with experimental results and the engineering drawing of product

محدوده تغییرات بخش‌های مختلف قطعه	نتایج حاصل از شبیه سازی در قالب دارای طول بیرینگ (اول) (mm)	نتایج حاصل از شبیه سازی در قالب دارای تغذیه کننده و طول بیرینگ (دوم) (mm)	نتایج حاصل از آزمایش تجربی در قالب دارای طول بیرینگ (اول) (mm)	اندازه این بخش ها روی نقشه اصلی قطعه (mm)
1- طول تاج	(38.24 , 40.13)	(41.49 , 42.71)	(39.6 , 41)	40
2- عرض تاج	(9.74 , 10.82)	(9.97, 10.81)	(9.4 , 9.5)	9.5
3- رابط بین تاج و قسمت مرکز	(15.88 , 16.86)	(16.19 , 16.94)	(15.1 , 15.4)	15.5
4- شعاع قسمت مرکزی	(40.97 , 41.92)	(41.10 , 42.02)	(41.1 , 41.15)	41
5- شعاع بزرگ قطعه	(75.24 , 76.05)	(75.89 , 76.63)	(75.1 , 75.15)	74



Fig. 12 The cracks created in crown part produced by using first die

شکل 12 ترک‌های ایجاد شده در قسمت تاج قطعه تولید شده توسط قالب اول

می‌شود را کاملاً نشان می‌دهد.

4-2- بررسی سرعت اکستروژن

از دیگر پارامترهای مهم در این فرایند سرعت اکستروژن می‌باشد. با افزایش سرعت اکستروژن، کار مکانیکی که روی فلز انجام می‌شود بیشتر شده که این عامل خود باعث تولید حرارت و افزایش دمای قطعه کار می‌شود. با توجه به اینکه برای هر فلز یک دمای ماکزیمی تعریف شده که از آن دما به بعد فلز دچار شکنندگی حرارتی¹ می‌شود پس می‌بایست سرعت اکستروژن را در طول فرایند طبق دمای قطعه کار کنترل نمود [1]. اساساً سرعت اکستروژن با افزایش فاصله از مرکز قطعه کاهش می‌یابد. که این امر به دلیل وجود عامل اصطکاک بین محفظه و قالب با بیلت می‌باشد [2]. در شکل‌های 15 و 16 نمودار تغییرات سرعت نسبت به زمان برای سه نقطه از قطعه در بخش‌های تاج (P3)، رابط (P2) و قسمت مرکزی قطعه (P1) نمایش داده شده است. این نقاط در اشکال 13 و 14 نشان داده شده اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود سرعت قطعه در نقاط مختلف، در داخل قالب اول که فقط دارای طول بیرینگ است متفاوت بوده، به طوری که ماده قبل از خروج از قالب به ترتیب در بخش مرکزی، بخش رابط تاج و قسمت مرکزی و بخش تاج قطعه دارای بیشترین مقدار سرعت است که این امر به دلیل متفاوت بودن سطح مقطع قطعه در آن قسمت‌ها اتفاق افتاده است. اما در قالب دوم که دارای تغذیه کننده و طول بیرینگ است، سرعت در داخل قالب و در نقاط مختلف تقریباً کنترل شده و دارای یکنواختی بهتری نسبت به قالب اول است. به طور کلی می‌توان بیان کرد که اکستروژن مقطعی که دارای یک دیواره ضخیم مرکزی نسبت به سایر دیواره‌های اطراف هستند بسیار مشکل بوده و روش طول بیرینگ متغیر به تنهایی جوابگوی این مقاطع برای کنترل تغییرات سرعت به وجود آمده نمی‌باشد. برای تولید این چنین مقاطعی می‌بایست از

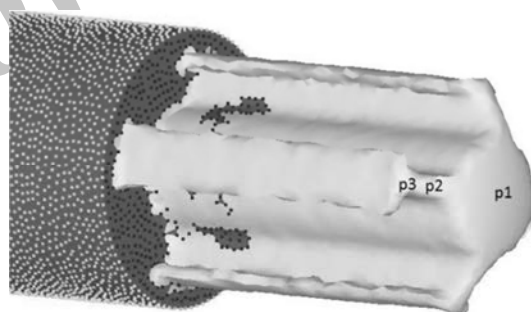


Fig. 13 A view of the contact surface of the billet with first die

شکل 13 نمایی از سطح تماس بیلت با قالب اول

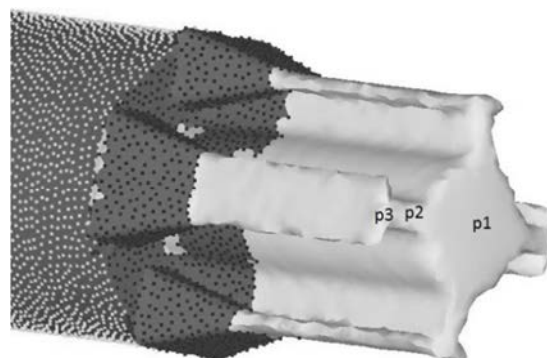


Fig. 14 A view of the contact surface of the billet with second die

شکل 14 نمایی از سطح تماس بیلت با قالب دوم

بیلت در اکثر نواحی تماس دارد که حاکی از پر شدن رضایت بخش قالب است. همین امر کارایی و تاثیر غیر قابل انکار تغذیه کننده را که هم موجب پر شدن کامل قالب و هم کنترل سرعت سیلان ماده پس از خروج از قالب

¹ Hot Shortness

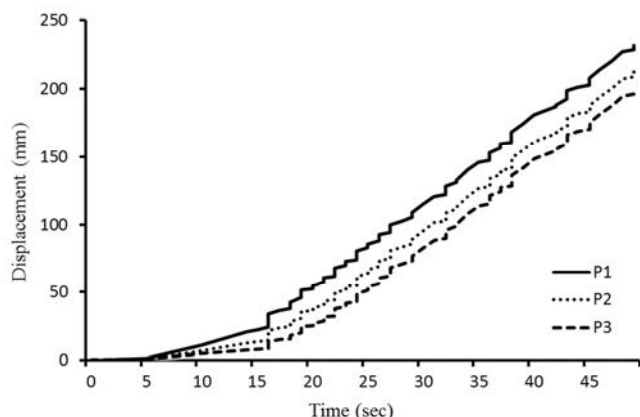


Fig. 17 Chart metal flow at different points in the first die

شکل 17 نمودار جابجایی ماده در نقاط مختلف در قالب اول

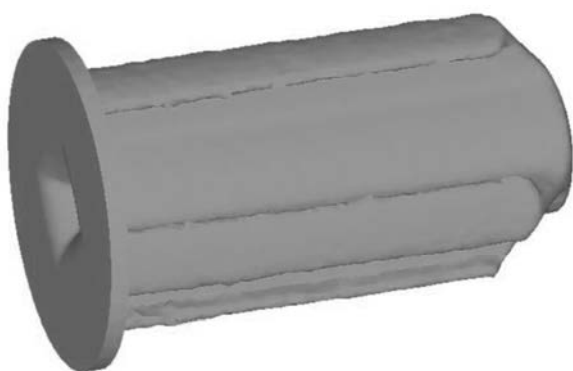


Fig. 18 Funnel formed at the end of the billet due to the lack of uniform metal flow rate

شکل 18 تشکیل قیف در انتهای بیلت به علت یکنواخت نبودن سرعت جریان فلز

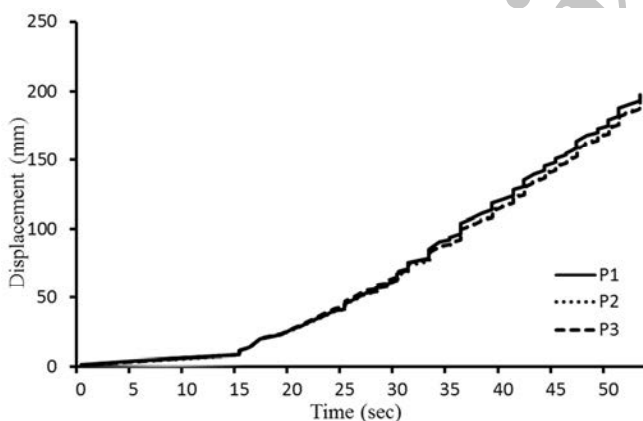


Fig. 19 Chart metal flow at different points in the second die

شکل 19 نمودار جابجایی ماده در نقاط مختلف در قالب دوم

باشد که شکل و هندسه قالب بسیار در این فرایند حائز اهمیت است.

4-4- بررسی دمای اکستروژن

همان‌طور که بیان شد دمای اکستروژن از جمله پارامترهایی است که رابطه مستقیم با سرعت اکستروژن دارد. به عبارتی در اکستروژن داغ می‌بایست کنترل مداومی روی دمای قطعه کار صورت گیرد تا از رسیدن دمای قطعه کار به حد متالوژیکی آن (نقطه انجماد¹) جلوگیری کند. افزایش دمای

هر دو روش طول بیرینگ متغیر و تغذیه کننده در دیواره‌های نازک‌تر به طور همزمان در قالب بهره برد.

4-3- بررسی جابجایی ماده

همان‌طور که بیان شد به علت متفاوت بودن سطح مقطع قطعه در نقاط مختلف، سرعت سیلان ماده هنگام خروج از قالب متفاوت است. به همین دلیل ما شاهد ایجاد اختلاف در جابجایی ماده هنگام خروج از قالب نیز خواهیم بود. مقدار این اختلاف می‌تواند توسط شکل هندسی قالب کاهش یابد یا به طور کلی از بین برود. همان‌طور که در شکل 17 مشاهده می‌شود در قالب اول که فقط دارای طول بیرینگ است بین قسمت مرکزی و قسمت تاج قطعه یک اختلاف جابجایی‌ای در حدود 32 میلیمتر وجود دارد. این اختلاف در جابجایی ماده موجب بروز یک حالت دماغه‌ای در جلوی قطعه و یک حالت قیفی شکل در انتهای بیلت می‌شود. ایجاد قیف در انتهای بیلت همانند شکل 18 یک عیب در اکستروژن به حساب می‌آید که موجب افزایش ضخامت ته بیلت باقیمانده می‌شود که مقرون به صرفه نیست. این اختلاف در جابجایی ماده می‌تواند با ایجاد محفظه تغذیه در مقطعی که دارای دیواره باریک‌تر هستند کاهش یافته و یا از بین برود. شکل 19 اختلاف بین جابجایی مواد را در قالب دوم که دارای تغذیه کننده و طول بیرینگ است نشان می‌دهد که به مقدار 6 میلیمتر کاهش یافته که می‌تواند بیانگر این مسئله

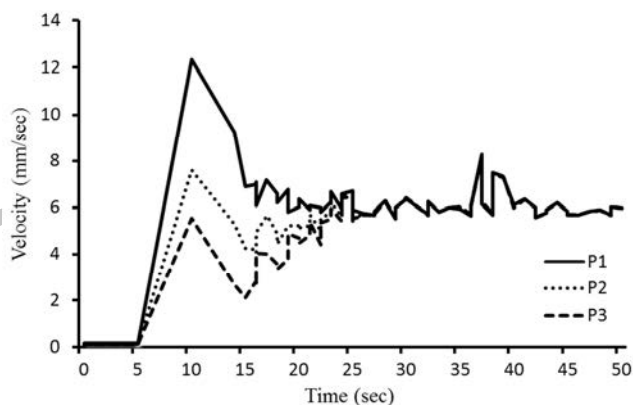


Fig. 15 Chart speed changes in three points of the produced part by using first die

شکل 15 نمودار تغییرات سرعت در سه نقطه قطعه تولید شده با قالب اول

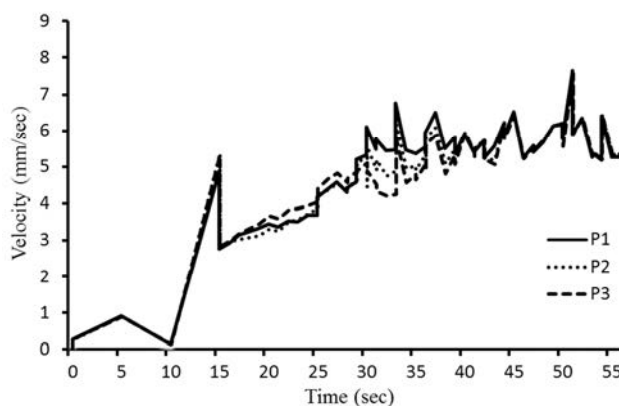


Fig. 16 Chart speed changes in three points of the produced part by using second die

شکل 16 نمودار تغییرات سرعت در سه نقطه قطعه تولید شده با قالب دوم

¹ Solidus Point

فرایند اکستروژن پایین تر باشد به نسبت آن می توان سرعت اکستروژن را افزایش داد که موجب افزایش بهره وری در تولید می شود.

4-5- بررسی نیروی اکستروژن

از دیگر پارامترهایی که در فرایند اکستروژن حائز اهمیت بوده و می تواند در انتخاب ظرفیت پرس موثر باشد، نیروی اکستروژن است. همان طور که در شکل 22 مشخص است، نیرو در قالب اول که فقط دارای طول بیرینگ است، پس از ورود بیلت به قالب با یک شیب نسبتاً زیادی افزایش یافته است. اما در قالب بهینه شده با تغذیه کننده و طول بیرینگ مطابق شکل 23 نیرو کم کم و با یک شیب ملایم تری بالا رفته که نشان دهنده تغییر شکل اولیه فلز در داخل محفظه تغذیه این قالب می باشد. همچنین در قالب بهینه به علت تماس بیشتر فلز با سطح قالب و ایجاد نیروی اصطکاک، مقدار نیرو در این قالب اندکی بیشتر است. افزایش ناگهانی نیرو با شیب زیاد در تولید بالا می تواند موجب تسریع در مستهلک شدن سطح قالب و کاهش کیفیت ابعاد قطعه تولیدی شود. این مطلب به خصوص در تولید قطعات از جنس آلیاژهای سخت بیشتر نمود دارد. در نتیجه استفاده از تغذیه کننده در اکستروژن مواد با شکل پذیری سخت به کاهش نیروی ماکزیمم در فرایند کمک می کند، که احتمالاً علت آن نیز انجام تغییر شکل در دو مرحله و در داخل محفظه تغذیه و سطح بیرینگ است [15].

4-5- نتیجه گیری

در این مقاله اکستروژن کردن یک مقطع تقارن محوری، با ضخامت دیواره

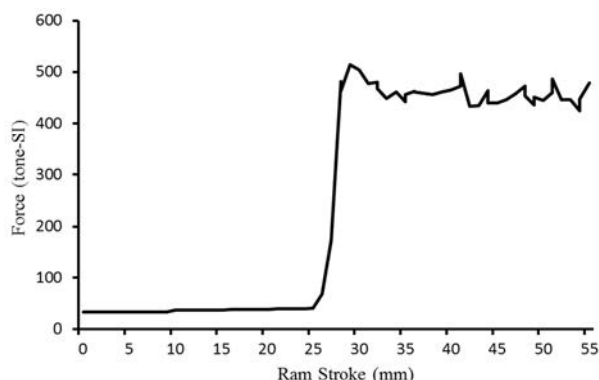


Fig. 22 Force-displacement curve for direct extrusion process (using first die)

شکل 22 منحنی نیرو-جابجایی برای فرایند اکستروژن مستقیم (برای قالب اول)

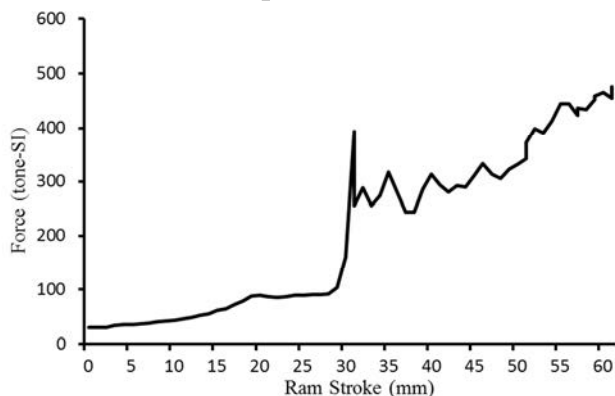


Fig. 23 Force-displacement curve for direct extrusion process (using second die)

شکل 23 منحنی نیرو-جابجایی برای فرایند اکستروژن مستقیم (برای قالب دوم)

اکستروژن از این مقدار بحرانی می تواند منجر به تشکیل عیوب سطحی به شکل شکنندگی حرارتی و یا ترک شود. حتی دما زیر این مقدار بحرانی نیز می تواند موجب تبلور مجدد موضعی¹ و رشد دانه ای شود [13,14]. تبلور مجدد موضعی در محیط اطراف یک محصول اکستروژنی با عنوان درشت دانگی محیطی شناخته می شود. لایه خارجی تبلور مجدد یافته ممکن است سبب تغییر در خواص مکانیکی، به خصوص ایجاد تنش کششی پایین تر نسبت به مرکز تبلور مجدد نیافته گردد [1]. نقطه انجام این آلیاژ در حدود 480 الی 490 درجه سلسیوس می باشد. همان طور که در شکل های 20 و 21 مشاهده می شود، دمای بیلت در هر دو قالب از این مقدار بالاتر نرفته و قابل قبول است. دمای قطعه کار در ابتدای فرایند در هر سه قسمت به علت تبادل حرارت بین بیلت و سایر ابزارها کاهش یافته است. سپس با آغاز کار مکانیکی روی بیلت و ایجاد حرارت، دما بالا رفته و مجدداً پس از خروج قطعه از قالب دما کاهش می یابد. علت کاهش دما در بخش تاج و رابط قطعه نسبت به مرکز به دلیل سطح تماس بیشتر بیلت با قالب و انتقال حرارت است. همچنین دما در قالب دوم که دارای تغذیه کننده است به علت سطح تماس بیشتر نسبت به قالب اول دچار کاهش و افزایش دمای بیشتری در بخش تاج و رابط شده است. کاهش دما به دلیل سطح تماس بزرگتر و انتقال حرارت بیشتر و در مقابل افزایش دما نیز به دلیل سطح تماس بیشتر و ایجاد حرارت ناشی از اصطکاک و کار مکانیکی اتفاق افتاده است. هرچه دمای قطعه کار در طول

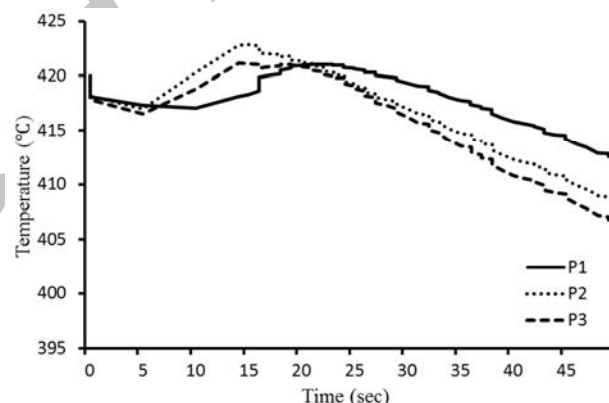


Fig. 20 Temperature changes at three points on the produced part by using first die

شکل 20 تغییرات دما در سه نقطه قطعه تولید شده با قالب اول

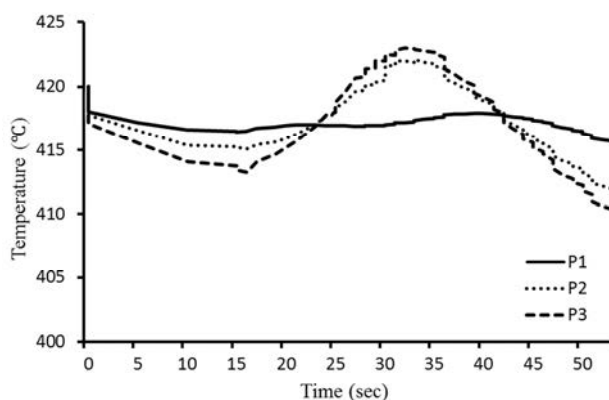


Fig. 21 Temperature changes at three points on the produced part by using second die

شکل 21 تغییرات دما در سه نقطه قطعه تولید شده با قالب دوم

¹ Local Recrystallization

اکستروژن در حدود 6.5 درصد نسبت به قالب اول بیشتر افزایش می‌یابد. از طرفی چون ماده در محفظه تغذیه این قالب دچار تغییر شکل اولیه می‌شود نیرو با شیب بسیار ملایم‌تری نسبت به قالب اول افزایش می‌یابد که می‌تواند افزایش طول عمر قالب و عملکرد بهتر پرس در تیراژ تولید بالا را به دنبال داشته باشد.

7- ماکزیمم دمایی که در طول اکستروژن در هر دو قالب بدست آمده کمتر از دمای متالورژیکی قطعه کار بوده و مقداری در حدود 423°C دارد.

8- اکستروژن مقطع‌هایی که دارای یک بخش با سطح مقطع خیلی بزرگتر نسبت به سایر بخش‌ها هستند، عملاً با استفاده از قالبی که دارای تغذیه کننده و طول بیرینگ متغیر است آسان‌تر بوده و از لحاظ اقتصادی نیز به صرفه‌تر است.

6- مراجع

- [1] P. K. Saha, *Aluminum extrusion technology*. Asm International, pp. 87-115, (Translated by H. Ghiasi), Organization Publications Jihad Collegiate, 2000. (فارسی)
- [2] G. Fang, J. Zhou, J. Duszczek, Effect of pocket design on metal flow through single-bearing extrusion dies to produce a thin-walled aluminium profile, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 199, No. 1, pp. 91-101, 2008.
- [3] Q. Li, C. J. Smith, C. Harris, M. R. Jolly, Finite element investigations upon the influence of pocket die designs on metal flow in aluminium extrusion: Part I. Effect of pocket angle and volume on metal flow, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 135, No. 2, pp. 189-196, 2003.
- [4] W. F. Hosford, R. M. Caddell, *Metal Forming: Mechanics and Metallurgy*, pp. 69-71, Cambridge University Press, Third Edition, 2011.
- [5] K. Lange, *Handbook of metal forming*, pp. 627-647, McGraw-Hill Book Company, First Edition, 1985.
- [6] Q. Li, C. J. Smith, C. Harris, M. R. Jolly, Finite element modelling investigations upon the influence of pocket die designs on metal flow in aluminium extrusion: Part II. Effect of pocket geometry configurations on metal flow, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 135, No. 2, pp. 197-203, 2003.
- [7] J. Zhou, L. Li, J. Duszczek, 3D FEM simulation of the whole cycle of aluminium extrusion throughout the transient state and the steady state using the updated Lagrangian approach, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 134, No. 3, pp. 383-397, 2003.
- [8] D. W. Zhang, H. Ou, Relationship between friction parameters in a Coulomb-Tresca friction model for bulk metal forming, *Tribology International*, Vol. 95, pp. 13-18, 2016.
- [9] DEFORM_{TM} 3D Version 10.0 User's Manual, *Scientific Forming Technologies Corporation*, Accessed on 30 June 2009; <http://www.deform.com/products/deform-3d>.
- [10] T. Chanda, J. Zhou, J. Duszczek, FEM analysis of aluminium extrusion through square and round dies, *Materials & Design*, Vol. 21, No. 4, pp. 323-335, 2000.
- [11] T. Chanda, J. Zhou, L. Kowalski, J. Duszczek, 3D FEM simulation of the thermal events during AA6061 aluminum extrusion, *Scripta Materialia*, Vol. 41, No. 2, pp. 195-202, 1999.
- [12] F. Khorasani, *Technology Extrusion of Aluminium Alloys*, pp. 49-62, Tehran: Kian Rayaneh Sabz, 2009. (فارسی)
- [13] Z. Peng, and T. Sheppard, Study of surface cracking during extrusion of aluminium alloy AA 2014, *Materials Science and Technology*, Vol. 20, No. 9, pp. 1179-1191, 2004.
- [14] G. Fang, J. Zhou, J. Duszczek, FEM simulation of aluminium extrusion through two-hole multi-step pocket dies, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 4, pp. 1891-1900, 2009.
- [15] D. Lesniak, W. Libura, Extrusion of sections with varying thickness through pocket dies, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 194, No. 1, pp. 38-45, 2007.

متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. در ابتدای کار، به دلیل متفاوت بودن ضخامت دیواره‌ها در بخش‌های مختلف قطعه، سرعت سیلان ماده در هنگام خروج از قالب متفاوت بوده است. برای به کنترل در آوردن سرعت فلز در این مطالعه از دو قالب مختلف از لحاظ شکل هندسی استفاده شد. در قالب اول برای یکنواخت نمودن سرعت از روش طول بیرینگ متغیر و در قالب دوم از روش ایجاد تغذیه کننده در مقاطع نازک‌تر به همراه طول بیرینگ متغیر استفاده شد. از آنالیز تجربی و عددی این فرایند، موارد ذیل استنتاج گردید:

1- سرعت سیلان ماده هنگام خروج از قالب با تغییرات در هندسه قالب تغییر می‌کند، به طوری که در این قطعه سرعت خروجی فلز در قالب دوم به دلیل وجود تغذیه کننده در دیواره‌های نازک‌تر نسبت به قالب اول دارای یکنواختی بهتری بوده است.

2- در قالب اول ماکزیمم سرعت فلز در داخل قالب و در قسمت مرکز قطعه اتفاق افتاده که برابر 12.34 (mm/sec) است، اما در قالب دوم ماکزیمم سرعت در خارج از قالب و یکسان در تمام نقاط سطح مقطع بدست آمده و مقداری برابر 7.64 (mm/sec) دارد. دلیل افزایش سرعت فلز در خارج از قالب دوم نیز به دلیل وجود تغذیه کننده مخروطی شکل است.

3- سرعت سیلان ماده هنگام خروج از قالب می‌تواند روی کیفیت ابعادی به‌دست آمده و نحوه پر شدن قالب در بخش‌های مختلف اثر گذار باشد. به‌طوری که در قالب دوم کیفیت تolerانس ابعادی حاصل شده به دلیل وجود تغذیه کننده و پر شدن کامل قالب خصوصاً در بخش‌های نازک‌تر نسبت به قالب اول که فقط دارای طول بیرینگ است بسیار راضی کننده‌تر است. به عنوان مثال اندازه حفره قالب در قسمت طول تاج در هر دو قالب برابر 43.35 mm بوده و اندازه بدست آمده از آنالیز عددی برای این بخش از قطعه در قالب اول 39.31 mm و برای قالب دوم 41.95 mm بوده است که با توجه به درصد انقباض ماده بیلِت، نشان دهنده پر شدن بهتر قالب در کانال‌های باریک‌تر است.

4- بیشترین اختلاف در جابجایی ماده بین نقاط مرکزی ($p1$) و بیرونی ($p3$) قطعه اتفاق افتاده که در قالب اول در حدود 32 mm و در قالب دوم در حدود 6 mm است. این مقدار بین نقاط دور از مرکز یعنی نقاط ($p2$) و ($p3$) کاهش یافته که برای قالب اول 12.37 mm و برای قالب دوم 0.66 mm است. نتایج بدست آمده گویای این مطلب است که قالب دوم تا حدود بسیار زیادی توانسته نرخ جابجایی مواد را در نقاط مختلف به طور بهینه کنترل نماید.

5- عدم کنترل در سرعت و جابجایی ماده بین قسمت مرکزی و سایر نقاط قطعه می‌تواند موجب تشکیل عیوبی همچون ایجاد ترک در بخش‌های نازک‌تر به دلیل وجود تنش پسماند کششی و تشکیل قیف در انتهای بیلِت شود که موجب افزایش ضایعات و کاهش بهره وری می‌شود.

6- در قالب دوم که دارای تغذیه کننده است، به دلیل وجود سطح تماس بیشتر بیلِت با قالب و همچنین اصطکاک ناشی از آن نیروی