METALLURGICAL ENGINEERING
The Journal of Iranian Metallurgical and Materials Engineering Society

Winter 2021, Volume 23, number 4

The influence of extrusion die angle on the deformation force and hardness of AA6061 aged aluminum section

***Bahman Mirzakhani[1], Mostafa Mansoorinejad[2], Yousef Payandeh[3]**

1- Associate Professor, Department of Materials Science and Metallurgy, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran.
2- Assistant Professor, Department of Materials Science and Metallurgy, Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Dezfoul, Iran
3- Assistant Professor, Department of Materials Science and Metallurgy, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran.

Citation: Mirzakhani B, Mansoorinejad M, Payandeh Y. The influence of extrusion die angle on the deformation force and hardness of AA6061 aged aluminum section. Metallurgical Engineering 2021: 23(4): 276-281 http://dx.doi.org/10.22076/ME.2021.82763.1178

doi : http://dx.doi.org/10.22076/ME.2021.82763.1178

ABSTRACT

Die angle has a great influence on the product quality and extrusion force. In this research, the influence of die angle on extrusion force and hardness distribution in AA 6061 alloy was investigated. The 6061 aluminum billets were initially reheated and then extruded by different die angle molds and finally artificially aged. The half die angles of 30°, 45° and 60° in a single facet molds and 60° and 30° in a two facet mold were employed in extrusion experiments. The results show that the sample surfaces of extruded rods with all die angles mold have the most value of hardness. Meanwhile, by increasing the half dies angle, the hardness gradient form sample surface to its inside increases. In two facet mold, the change in die angle from 60° to 30° results in deformation homogeneity and increasing in extrusion force. However, the mold with 45° die angle requires the minimum force for pressing.

Keywords: 6061 Aluminum alloy- extrusion- half die angle- precipitation hardening.

Received: 7 March 2018 | Accepted: 14 September 2021

* *Corresponding Author*:
Bahman Mirzakhani, PhD
Address: Department of Materials Science and Metallurgy, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran.
Tel: +98 (8632625820)
E-mail: b-mirzakhani@araku.ac.ir

بررسی تاثیر زاویه قالب اکستروژن بر نیروی تغییر شکل و توزیع سختی در مقطع آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۱ پیرسخت شده

بهمن میرزاخانی[۱]، مصطفی منصوری نژاد[۲]، یوسف پاینده[۳]

۱- دانشیار، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران.
۲- استادیار، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول، دزفول، ایران.
۳- استادیار، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران.

چکیده

در فرآیند اکستروژن قالب تاثیر بسیار زیادی بر کیفیت و خواص مقاطع اکسترودی و ظرفیت پرس مورد استفاده می‌گذارد. هدف از این تحقیق، بررسی تاثیر زاویه قالب بر نیروی اکستروژن و توزیع سختی در نمونه هایی از آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۱ است. بیلت‌های این آلیاژپس از پیشگرم با قالبهای مختلف از نظر زاویه تغییر شکل داده شده و سپس پیرسخت شدند. در سه قالب مورد استفاده، نیم زاویه برابر ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه بوده و در قالب چهارم، نیم زاویه ۶۰ درجه در میانه قالب به ۳۰ درجه تبدیل شده است. نتایج نشان می دهند که سختی همه نمونه ها در سطح بیشتر از مغز است و با افزایش نیم زاویه، تفاوت سختی بین سطح و مغز نیز افزایش می یابد. همچنین، تبدیل نیم زاویه ۶۰ درجه به ۳۰ درجه در میانه قالب چهارم، باعث افزایش نیروی اکستروژن و یکنواخت تر شدن تغییر شکل می شود. در بین قالبهای مورد استفاده، قالب با نیم زاویه ۴۵ درجه کمترین نیروی اکستروژن را دارد.

واژه‌های کلیدی: آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۱- اکستروژن- نیم زاویه قالب- پیرسختی.

دریافت: ۱۳۹۶/۱۲/۱۶ | **پذیرش:** ۱۴۰۰/۰۶/۲۳

۱. مقدمه

اکستروژن مستقیم یکی از مهمترین فرایندهای شکل دهی فلزات است که بخاطر توانایی در تولید محصولات طولی متنوع، کاربرد فراوانی دارد.فشار اکستروژن و خواص مکانیکی محصول تولید شده، به عواملی همچون میزان کاهش در سطح مقطع، دما، نرخ کرنش، ضریب اصطکاک و شکل هندسی قالب بستگی دارد[۱-۳]. در واقع، این عوامل با تاثیرگذاری بر الگوی سیلان ماده، منجر به تغییر در مقدار و توزیع تغییر شکل پلاستیک در مقطع میلگرد اکسترودی می‌شوند. آلیاژهای آلومینیم گروه ۶۰۰۰ جزو آلیاژهای عملیات حرارتی پذیر آلومینیم بوده که مهمترین مکانیزم استحکام دهی آنهارسوب سختی است. چنانچه در ضمن تولید، روی آلیاژ ترکیبی از تغییرشکل پلاستیک و عملیات پیرسازی انجام شود، این دو فرآیند بر یکدیگر اثر می گذارند. مثلا انباشت نابجایی‌ها در طی تغییرشکل پلاستیک منجر به تسریع فرآیند رسوب سختی می شود. در مقابل تشکیل رسوبات نیز حرکت نابجایی‌ها را دشوار ساخته و سیلان پلاستیک ماده سخت‌تر می‌گردد[۴-۵]. پارامترهای فرآیندی فوق می‌توانند بر هم کنش تغییرشکل پلاستیک و پدیده رسوب سختی را تحت‌الشعاع قرار دهند.

سولومن [۱] تاثیر شکل قالب بر شکل ناحیه مرده و فشار هیدرواستاتیک در اکستروژن مستقیم را بررسی کرده و نتیجه گرفته است که با افزایش شعاع گوشه قالب[۱] در دهانه خروجی، ناهمگنی تغییر شکل به حداقل می رسد. چادهاری و همکارانش [۶] تاثیر زاویه قالب بر سختی و کیفیت سطحی دو نوع از آلیاژهای آلومینیم را بررسی کرده و گزارش کرده‌اند که استفاده از قالب با نیم زاویه 45^{o}، به دلیل توازن بین کار اصطکاکی و کار اضافی[۲]، باعث ایجاد کمترین سختی در

1. -Die Fillet Radius
2. -Redundant Work

* نویسنده مسئول:
دکتر بهمن میرزاخانی
نشانی: اراک، دانشگاه اراک، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مواد و متالورژی.
تلفن: (۸۶۳۲۶۲۵۸۲۰) ۹۸+
پست الکترونیکی: b-mirzakhani@araku.ac.ir

محصولات اکسترودی می شوند. دوناوان و همکارانش [۷] تاثیر دماهای مختلف پیرسختی بر استحکام تسلیم آلیاژهای آلومینیم سری ۶۰۰۰ اکسترود شده را بررسی کرده اند و نتیجه گرفته اند که استحکام تسلیم آلیاژهای پیرسخت شده در دمای ۱۷۷ درجه سانتیگراد به حداکثر مقدار خود می رسد. آدسون و همکارانش [۳] تاثیر جنس و زاویه قالب بر فشار اکستروژن و خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۳ را بررسی کرده اند. آنها نتیجه گرفته اند که بیشترین فشار اکستروژن وقتی است که زاویه قالب ۹۰ درجه باشد و از این نظر، تفاوتی بین قالبهای ساخته شده از فولاد ابزار و فولاد ساده کربنی نیست. تحقیق برنت و همکارانش [۸] روی تاثیر دمای اکستروژن بر رفتار پیرسختی و خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۰ نشان داد که توزیع کرنش سختی و پیرسختی دینامیکی در محصول، متاثر از دما و ناهمگنی تغییر شکل است. هر چند که تحقیقات قابل توجهی در زمینه تاثیر پارامترهای اکستروژن بر خواص مکانیکی آلیاژهای آلومینیم گروه ۶۰۰۰ انجام شده است، ولی کارهای زیادی روی تاثیر این پارامترها بر رفتار پیرسختی آلیاژهای مذکور به چشم نمی خورد. بنابراین هدف از این تحقیق، بررسی تاثیر زاویه قالب بر فشار اکستروژن، رفتار پیرسختی و توزیع سختی در مقطع میلگرد اکسترود شده آلومینیم ۶۰۶۱ است.

۲. مواد و روش تحقیق

ماده مورد استفاده در این تحقیق، آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۱ در حالت آنیل شده (O-Temper) است که ترکیب شیمیایی آن در جدول ۱ ارایه شده است. میلگردهایی از این آلیاژ به قطر ۱۰ و طول ۲۰ میلیمتر تهیه و در دمای ۵۲۰°C به مدت یک ساعت آنیل و سپس در آب کوئنچ شدند.

چهار قالب و سنبه مورد نیاز در این تحقیق از فولاد ابزار ساخته شدند.تصاویر این ابزار در شکل ۱ نشان داده شده است. قطر ورودی و خروجی تمام قالبها به ترتیب ۱۰ و ۶ میلیمتربوده است.نیم زاویه قالبهای A، B و Cبه ترتیب ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه بوده ولی همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده، نیم زاویه قالب D در نیمه اول قالب، ۶۰ درجه و در نیمه بعدی آن ۳۰ درجه بوده است. طول منطقه تغییر شکل نیزدر قالبهای A، B، C و D به ترتیب ۳/۵، ۲، ۱/۲ و ۲/۳ میلیمتر بوده است.

آزمایشهای اکستروژن، با استفاده از دستگاه یونیورسال کشش- فشار شرکت ایرانی سنتام با ظرفیت ۱۵ تن انجام

الف

ب

شکل ۱. تصویر ابزار مورد استفاده: الف- قالبها، ب- سنبه.

شد. روانکار مورد استفاده نیز گریس بوده است. تصویر نمونه‌های اکسترود شده در شکل ۲ نشان داده شده است.

نمونه های مختلف اکسترود شده در دمای ۲۰۰ °C به مدت ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ ساعت نگهداری و در هوا سرد شدند. برای جلوگیری از پیرسختی طبیعی،کلیه نمونه ها تا زمان سختی سنجی در دمای ۱۸- °C نگهداری شدند. سختی نقاط مختلف مقطع نمونه های اکسترود شده به فواصل ۰/۳ میلیمتر از سطح به سمت مرکز و به روش ویکرز، تحت بار صد گرم و با استفاده از دستگاه میکروسختی سنجی ساخت شرکت Innovatest کشور هلند انجام گرفت. عدد سختی گزارش شده برای هر حالت، میانگین ۳ بار آزمایش است.

۳. نتایج و بحث

نمودار نیروی اکستروژن بر حسب جابجایی سنبه در شکل ۳ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، استفاده از قالب با نیم زاویه ۴۵ درجه باعث می شود نیروی اکستروژن به حداقل برسد. دلیل این موضوع بهینه شدن انرژی اتلافی اصطکاکی و کار زائد اکستروژن است.در واقع، کاهش نیم زاویه قالب از ۴۵ به ۳۰ درجه باعث افزایش سطح تماسبین قطعه کار و قالب و در پی آن، افزایش نیروی اصطکاک می شود. در مقابل، افزایش نیم زاویه قالب از ۴۵ به ۶۰ درجه منجر به افزایش برش داخلی ماده و در نتیجه کار اضافی می‌شود [۹و ۱۰]. البته، استفاده از روانکار باعث شد که اتلاف انرژی ناشی از اصطکاک کمتر از کار اضافی شود. به

جدول ۱. ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۱ مورد استفاده(درصد وزنی)

Al	Fe	Cr	Cu	Zn	Si	Mn	Mg
باقیمانده	۰/۲۶	۰/۰۴	۰/۱۶	۰/۰۱	۰/۴۱	۰/۰۷	۰/۹۰

A

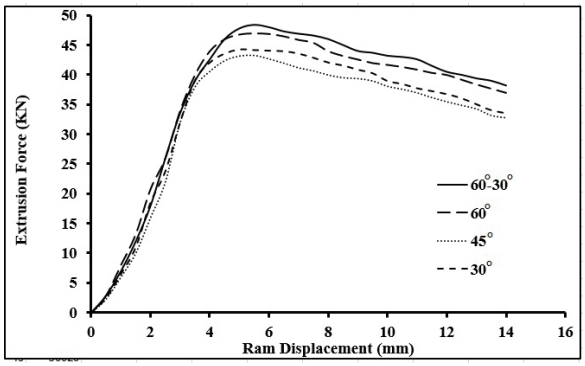
B

C

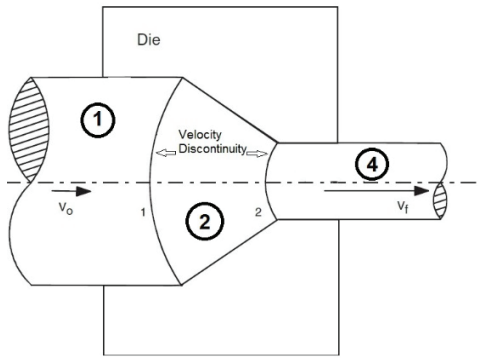
D

شکل ۲. نمونه های اکسترود شده با قالبهای A، B، C و D.

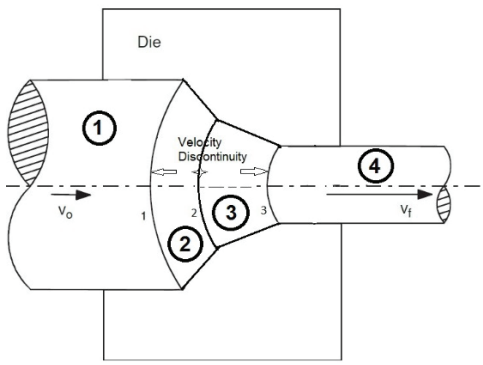
همین دلیل، نیم زاویه ۳۰ درجه نسبت به ۶۰ درجه نیروی اکستروژن کمتری را موجب می شود. استفاده از قالب D که نیم زاویه آن در نیمه ابتدایی قالب برابر۶۰ درجه و در نیمه انتهایی آن برابر ۳۰ درجه است،باعث افزایش اندکی در نیروی اکستروژن نسبت به هنگام استفاده از قالب با نیم زاویه ۶۰ درجه می شود. با توجه به یکسان بودن کاهش در سطح مقطع در تمام قالبها، تبدیل نیم زاویه قالب از ۶۰ به ۳۰ درجه باعث افزایش در سطح تماس قالب و ماده می شود. از طرفی دیگر، طبق تئوری حد بالایی، این تغییر نیم زاویه باعث ایجاد یک سطح اضافی ناپیوستگی سرعت می شود. در سایر قالبها، دو سطح ناپیوستگی سرعت وجود دارد (در دهانه‌های ورودی و خروجی)،درصورتی که در قالب D و در مرز تبدیل نیم زاویه ۶۰ به ۳۰ درجه، ناپیوستگی سرعت دیگری نیز ایجاد می شود (شکل ۴). البته قابل ذکر است که بر اساس تحلیل حد بالایی، مجموع کار اضافی مصرفی روی سطوح ۲ و ۳ در قالب D بیشتر از کار اضافی مصرفی روی سطح ۲ در قالب B است [۹].



شکل ۳. تاثیر نیم زاویه قالب بر منحنی نیرو-جابجایی اکستروژن.

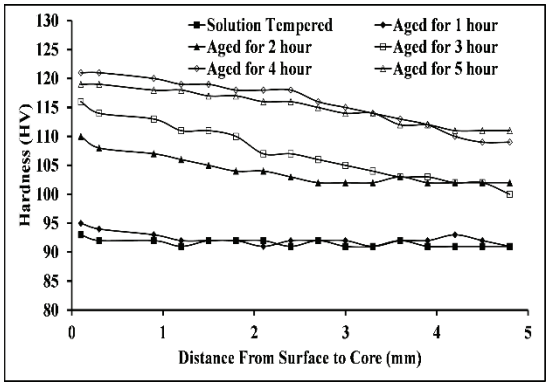


الف

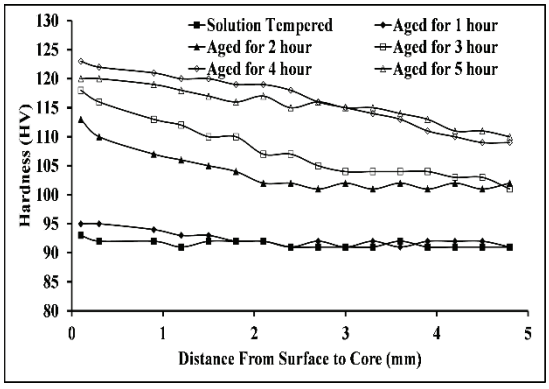


ب

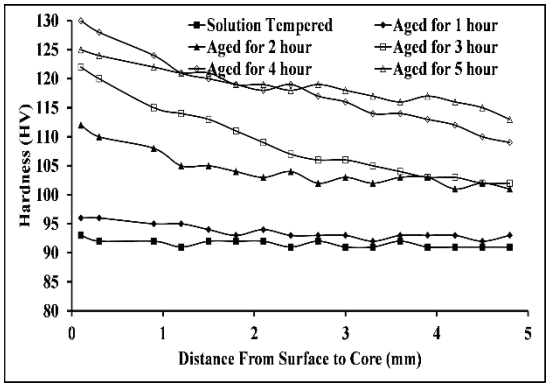
شکل ۴. نواحی مختلف قطعات در حال تغییر شکل با استفاده از قالبهای مختلف: الف- قالبهای A، B و C ، ب- قالب D-(ناحیه ۱: ماده تغییر شکل نیافته، نواحی ۲ و ۳: ماده در حال تغییر شکل، ناحیه ۴: ماده اکسترود شده. مرز بین هر دو ناحیه مجاور نشان دهنده ناپیوستگی سرعت است.)



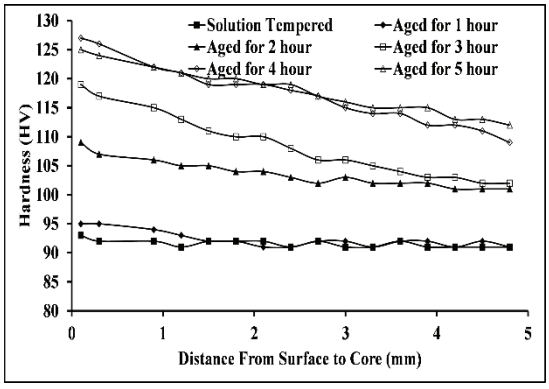
الف



ب



ج



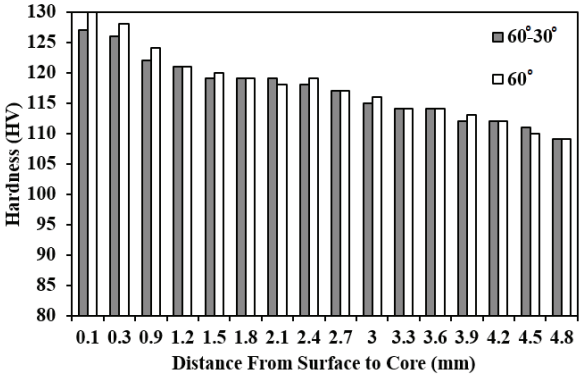
د

شکل ۵. تاثیر زمان پیرسختی بر توزیع سختی در مقطع نمونه های تولید شده توسط قالبهای الف- A، ب- B، ج- C و د- D.

تاثیرزاویه قالب بر نیروی اکستروژن، به دلی لتاثیرگذاری آن بر الگوی تغییر شکل و توزیع کرنش در مقطع نمونه است [۱۱]. به همین دلیل، رفتار پیرسختی آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۱ نیز متاثر از اندازه زاویه قالب می شود. شکل۵ تاثیر زمان پیرسختی بر توزیع سختی در مقطع نمونه های اکسترود شده توسط قالبهای مختلف را نشان می دهد.مشاهده می شود که با حرکت از سطح به مغز در همه نمونه ها، سختی کاهش می‌یابد. این موضوع ناشی از تمرکز بیشتر کرنش در لایه های سطحی و در نتیجه افزایش کرنش در این مناطق نسبت به نواحی مرکزی است.

با افزایش نیم زاویه قالب، تفاوت کرنش ایجاد شده در نواحی سطحی و مرکزی بیشتر می شود. از طرفی دیگر، هرچه کرنش وارده به ماده بیشتر شود، به دلیل ایجاد عیوب ساختاری مانند نابجاییها و جاهای خالی، شرایط نفوذ اتمی تسهیل می شود. نتیجه اینکه در عملیات پیرسختی آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۱ ، رسوبات استحکام بخش Mg_2Si سریعتر تشکیل می شوند. نکته قابل توجه در شکل ۵ این است که با افزایش زمان پیرسازی از ۴ ساعت به ۵ ساعت، سختی در برخی نقاط کاهش می یابد. این مطلب می تواند ناشی از این باشد که پس از ۴ ساعت زمان پیرسازی و با گذشت زمان، رسوبات Mg_2Si شروع به درشت شدن می کنند.همانطور که در شکل ۵مشاهده می شود، در قالب Cبا نیم زاویه ۶۰ درجه، فقط نواحی سطحی دچار پیرشدگی می شوند و با کاهش نیم زاویه قالب، منطقه پیر شده به سمت مرکز نمونه توسعه می‌یابد. این مطلب ناشی از این است که با کاهش نیم زاویه قالب، تغییر شکل در مقطع نمونه یکنواخت تر می شود.

شکل ۶ نشان می دهد که تبدیل نیم زاویه ۶۰ درجه به ۳۰ درجه در میانه قالب D باعث یکنواخت تر شدن تغییر شکل در مقطع نمونه می شود. با توجه به شکل ۴ می توان دریافت که بر خلاف قالب C که در دهانه خروجی آن،جهت حرکت یک المان فرضی از ماده بطور ناگهانی تغییر می کند، در قالب D تغییر جهت ماده در دو مرحله رخ می دهد. این



شکل ۶. مقایسه بین سختی نمونه های تولید شده توسط قالبهای C و D پیرسخت شده به مدت ۴ساعت.

موضوع می تواند منجر به پیشروی بیشتر تغییر شکل به مناطق مرکزی نمونه و یکنواخت تر شدن کرنش در مقطع آن شود.

۴. نتیجه‌گیری

از بررسی تاثیر نیم زاویه قالب اکستروژن بر توزیع سختی و نیروی اکستروژن، نتایج کلی زیر بدست آمد.

۱- در بین قالبهای مورد استفاده، قالب با نیم زاویه ۴۵ درجه باعث کمترین نیروی اکستروژن می شود.

۲- با حرکت از مغز به سطح، سختی پس از پیرسختی نمونه‌های تولید شده از همه قالبها افزایش می یابد.

۳- با افزایش نیم زاویه قالب، تفاوت سختی بین سطح و مغز نمونه های پیرسخت شده بیشتر می شود.

۴- حداکثر سختی در زمان پیرسختی ۴ ساعت بدست می‌آید. با افزایش زمان به مقدار بیش از ۴ ساعت، افت سختی مشاهده می شود. در قالب با نیم زاویه ۶۰ درجه، این افت سختی در نواحی سطحی است ولی با کاهش نیم زاویه قالب، مناطق درونی نمونه ها نیز دچار پیرشدگی و افت سختی می شوند.

۵- تبدیل نیم زاویه ۶۰ درجه به ۳۰ درجه، باعث افزایش نیروی اکستروژن و یکنواخت تر شدن تغییر شکل نسبت به قالب با نیم زاویه ۶۰ درجه می شود.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از حوزه معاونت محترم پژوهش و فناوری دانشگاه اراک بخاطر حمایت مالی این تحقیق، تشکر و قدردانی می کنند.

References

[1] N. Solomon, and L. Solomon, Effect of die shape on the metal flow pattern during direct extrusion process, Rev. Metal., 2010, Vol. 46, No. 5, pp. 396-404.

[2] N. V.Reddy, P.M. Dixit, and Lal, G.K. Die design for axisymmetric extrusion, J. Mat. Process. Tech., 1995, Vol. 55, pp. 331-339.

[3] S.O. Adeosun, O.I. Sekunow, Gbenebor, O.P., Effect of die entry angle on extrusion responses of aluminum 6063 alloy, Int. J. Eng. Tech., 2014, Vol. 4, pp. 127-134.

[4] M. Mansourinejad and B. Mirzakhani, Influence of sequence of cold working and aging treatment on mechanical behaviour of 6061 aluminum alloy, Trans. Nonferrous Met. Soc. China,2012,Vol. 22, pp. 2072−2079.

[5] B. Mirzakhani and M. Mansourinejad, Tensile properties of AA6061 in different designated precipitation hardening and cold working, Proc.Eng.,2011, Vol. 10, pp.136–140.

[6] G. A. Chaudhari,S.R. Andhale, N.G. Patil, Experimental evaluation of effect of die angle on hardness and surface finish of cold forward extrusion of aluminum, Int. J. Emerg. Tech. Adv. Eng., 2012, Vol. 2, pp. 334-338.

[7] R. Donovan, R. Fortune and R. Trout, Elevated temperature effects on the mechanical properties of age hardened 6xxx series aluminum alloy extrusions, M.S. Thesis, California State University, USA, 2015.

[8] N. Berndt, P. Frint, M.F. Wagner, Influence of extrusion temperature on the aging behavior and mechanical properties of an AA6060 aluminum alloy, Metals, 2018, Vol. 8, No. 1, pp. 51.

[9] B. Avitzur, Metal Forming: Processes and Analysis, 1968. Mc Graw-Hill, USA.

[10] B. Avitzur, Limit Analysis of Flow through Conical Converging Dies, 1975, J. Frank. Inst., Vol. 299, No.5, 338-358.

[11] F. Ghaemi, R. Ebrahimi and R. Hosseinpour, Optimization of die profile for cold forward extrusion using an improved slab method analysis, Iran J. Sci. Tech., Trans. Mech. Eng., 2013, Vol. 37, pp. 189-202.