



Experimental Investigation of the Effect of Processing Parameters on Mechanical Properties and Dimensional Changes of Warm Flow Formed AA6061 Aluminum Alloy Tube

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Khosravan J.¹
Rezaei Ashtiani HR.*¹
Deilami Azodi H.¹

How to cite this article

Khosravan J, Rezaei Ashtiani HR, Deilami Azodi H. Experimental Investigation of the Effect of Processing Parameters on Mechanical Properties and Dimensional Changes of Warm Flow Formed AA6061 Aluminum Alloy Tube. Modares Mechanical Engineering. 2021;21(7):489-499.

¹ Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran

*Correspondence

Address: Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran, P.O.B 38181-41167,
Phone: -
Fax: -
hr_rezaei@arakut.ac.ir

Article History

Received: January 13, 2021
Accepted: March 04, 2021
ePublished: June 21, 2021

ABSTRACT

The flow forming process is widely used in the production of axisymmetric industrial parts. The advantages of the flow forming process over other manufacturing methods are the use of simple tooling, reduced forming loads due to localized deformation, and enhanced mechanical properties and surface quality of finished parts. In this research, the warm flow forming process of AA6061-O aluminum alloy has been investigated for the first time. For this purpose, laboratory equipment and samples were designed and fabricated. In this study, the effect of temperature, thickness reduction, and number of passes (number of forming steps) on dimensional accuracy (thickness variation) and mechanical properties of warm flow formed AA6061-O alloy pipes have been experimentally investigated. The experimental results show that flow forming increases the strength and decreases the ductility of the formed pipe at all process levels compared to the initial non-flow forming pipe. However, the ductility of the pipe increases and its strength and microhardness decrease by increasing the forming temperature from 20 to 300 °C. While increasing the percentage of thickness reduction from 20% to 60% at a constant forming temperature, the strength and microhardness of the warm flow-formed pipe increases, and its ductility decreases.

Keywords Warm Flow Forming; AA6061 Aluminum Alloy; Temperature; Strength; Thickness Reduction

CITATION LINKS

[1] Experimental investigation on flow-forming of AA6061 alloy—a Taguchi approach. [2] Microstructure and mechanical properties of AZ80 magnesium alloy tube fabricated by hot flow forming. [3] Hot spinning formability of aluminum alloy tube. [4] Experimental study and analysis of surface roughness of the flow formed H30 alloy tubes. [5] Effect of flow-forming parameters on surface quality, geometrical precision and mechanical properties of titanium tube. [6] Research on precise control of microstructure and mechanical properties of Ni-based superalloy cylindrical parts during hot backward flow spinning. [7] Mechanical characterization of flow formed FCC alloys. [8] Experimental study of thickness reduction effects on mechanical properties and spinning accuracy of aluminum 7075-O, during flow forming. [9] Compression spinning of circular magnesium tube using heated roller tool. [10] An investigation of the development of defects during flow forming of high strength thin wall steel tubes. [11] Plastic flow instability under compressive loading during shear spinning process. [12] Experimental study and FEM analysis of redundant strains in flow forming of tubes. [13] Evolution of plastic strain during a flow forming process. [14] A study of the rational matching relationships amongst technical parameters in stagger spinning. [15] An experimental study on the quality of flow-formed AA6061 tubes. [16] Surface roughness prediction of flow-formed AA6061 alloy by design of experiments.

بررسی تجربی اثر پارامترهای فرآیندی بر خواص مکانیکی و تغییرات ابعادی لوله آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ فلورم شده گرم

جواد خسروان

کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک

حمیدرضا رضایی آشتیانی*

دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک

حامد دیلمی عضدی

دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک

چکیده

یکی از روش‌های مهم تولید قطعات صنعتی با تقارن محوری، شکل‌دهی ورق در فرآیند فلورمینگ می‌باشد. مزیت عمده این فرآیند تولید، استفاده از ابزار ساده، نیروی شکل‌دهی کم به خاطر تغییر شکل موضعی و افزایش خواص مکانیکی و کیفیت سطح قطعات نهایی تولیدی می‌باشد. در این تحقیق، فرآیند فلورمینگ گرم با استفاده از دستگاه تراش بر آلومینیوم آلیاژی AA6061-0 مورد بررسی تجربی قرار گرفت. بدین منظور ابتدا تجهیزات و قالب‌های مورد نیاز و نمونه‌های آزمایشگاهی طراحی و ساخته شدند. سپس اثر پارامترهای مختلف فرآیندی مانند درصد کاهش ضخامت ورق، درجه حرارت و تعداد مراحل شکل‌دهی (تعداد پاس) بر تغییرات ضخامت، دقت ابعادی و همچنین خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم فلورم شده گرم مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش‌ها نشان داد انجام فلورمینگ باعث افزایش استحکام و کاهش شکل‌پذیری لوله در تمامی سطوح فرآیندی نسبت به لوله ابتدایی فلورم نشده می‌گردد. اما با افزایش دمای شکل‌دهی از ۲۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد، درصد شکل‌پذیری لوله افزایش و استحکام و ریز سختی آن کاهش می‌یابد. درحالی‌که با افزایش درصد کاهش ضخامت از ۲۰ تا ۶۰٪ در یک دمای ثابت شکل‌دهی، میزان استحکام و ریز سختی لوله فلورم شده افزایش و شکل‌پذیری آن کاهش می‌یابد.

کلیدواژه‌ها: فلورمینگ گرم، آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱، درجه حرارت، استحکام، کاهش ضخامت

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۱۵

*نویسنده مسئول: hr_rezaei@arakut.ac.ir

۱- مقدمه

فرآیند اسپینینگ لوله یا فلورمینگ یک فرآیند شکل‌دهی دقیق و مقرون به صرفه برای تولید قطعات متقارن محوری بدون درز می‌باشد. در این فرآیند، نیروی وارده از طرف غلتک‌ها به پیش‌فرم در حال چرخش که بر روی مندرل بسته شده است، باعث می‌شود مواد تحت فشار زیر غلتک، تنشی بالاتر از حد تسلیم خود را تجربه کنند و جریان یابند. تغییر شکل موضعی، با تداوم حرکت چرخشی اسپیندل و حرکت محوری غلتک موازی با محور قطعه، باعث کاهش ضخامت و افزایش طول، بدون تغییر در قطر داخلی پیش‌فرم، می‌شود. بنابراین ضخامت قطعه نهایی وابسته به فاصله میان غلتک و مندرل بوده و طول آن با قانون حجم ثابت به دست می‌آید.

بر اساس ارتباطی که بین جهت جریان فلز و جهت حرکت ابزار در فلورمینگ وجود دارد، دو روش فلورمینگ به کار برده می‌شود. فلورمینگ مستقیم که در آن جهت جریان با جهت حرکت ابزار یکسان است و فلورمینگ معکوس که در آن جهت جریان عکس جهت حرکت ابزار می‌باشد^[1].

وانگ و همکاران^[2] در سال ۲۰۱۴ میلادی به بررسی اثر پارامترهای فرآیندی نظیر دما، کاهش ضخامت، سرعت دورانی و نرخ پیشروی بر روی خصوصیات ریز ساختاری لوله منیزیمی AZ80 در طی فرآیند فلورمینگ داغ پرداختند. بررسی آن‌ها نشان داد چنانچه پارامترهای فرآیندی در فلورمینگ گرم بطور بهینه انتخاب شود، می‌توان به خواص مکانیکی بالایی دست یافت. این محققین با بهینه‌سازی سطوح پارامترها توانستند به استحکام نهایی ۳۰۸ مگاپاسکال، استحکام تسلیم ۱۶۹ مگاپاسکال و کرنش نهایی ۹/۶٪ برسند. دلایل بهبود هم‌زمان استحکام و شکل‌پذیری توسط محققین به اثرات ترکیبی تبلور مجدد دینامیکی و کار سختی (ریزدانه شدن ریزساختار نسبت به ساختار درشت‌دانه ابتدایی) و حذف عیوب ریختگی که شامل تخلخل‌های انقباضی بوده است نسبت داده می‌شود.

شونچیرو و همکاران^[3] به بررسی اسپینینگ داغ آلومینیوم ۶۰۶۳ در شرایط مختلف فرآیندی پرداختند و اثر تعداد پاس و دمای شکل‌دهی را بر تغییرات ضخامت لوله، مورد بررسی قرار دادند. بررسی آن‌ها نشان داد با افزایش دما شکل‌دهی تغییرات ضخامت دیواره یک روند صعودی را طی می‌کند. تاراک و همکاران^[4] به بررسی تجربی اثر پارامترهای فرآیندی بر کیفیت سطح آلیاژ آلومینیوم ۶۰۸۲ پرداختند. بررسی آن‌ها نشان داد که نرخ پیشروی موثرترین پارامتر بر افزایش زبری سطح بوده و با افزایش نرخ پیشروی زبری سطح به شدت افزایش می‌یابد. ابراهیمی و همکاران^[5] به تأثیر پارامترهای فرآیندی بر خواص مکانیکی، کیفیت سطح و دقت ابعادی آلیاژ تیتانیوم در فلورمینگ سرد پرداختند. گانگ فنک و همکاران^[6] به مطالعه تغییر شکل داغ سوپر آلیاژ پایه نیکل ۲۳۰ هاینس پرداختند. بررسی آن‌ها نشان می‌دهد در دماهای بالاتر از ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد استحکام تسلیم و نهایی نسبت به استوانه ابتدایی افزایش داشته و هم‌چنین میزان تغییر طول هم اندکی افزایش داشته است. حق شناس و کلاس^[7] به بررسی رفتار کارسختی آلیاژهای fcc نظیر آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱، ۵۰۵۲، برنج ۳۰/۷۰ و مس خالص در طی فرآیند فلورمینگ پرداختند. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که میزان استحکام نهایی و تسلیم در جهت محوری برای تمامی نمونه‌ها نسبت به جهت شعاعی افزایش بیشتری داشته است و به دلیل جریان بیشتر مواد در جهت محوری نسبت به جهت شعاعی، کارسختی صورت گرفته در جهت محوری بیشتر از جهت شعاعی می‌باشد. ملاداودی و جوانرودی^[8] به بررسی اثر کاهش ضخامت بر روی خواص مکانیکی و دقت ابعادی آلومینیوم ۷۰۷۵ آنیل شده

پیش‌فرم بر روی مندرل نصب شده و سپس با یک سرعت دورانی مشخص، شروع به دوران می‌کنند. در ادامه غلتک در راستای محوری پیش‌فرم به آن نزدیک شده و پس از درگیر شدن با آن، میزان ماده مشخصی را در بر می‌گیرد. در همین حین ماده‌ای که بین غلتک و پیش‌فرم به تسلیم رسیده در خلاف جهت حرکت خطی غلتک شروع به جریان می‌کند. در نهایت ضخامت اولیه پیش‌فرم از t_0 به ضخامت نهایی t_f کاهش می‌یابد، بدون آن که تغییری در قطر داخلی لوله به وجود بیاید. در این تحقیق برای انجام فرآیند فلوفرمینگ از یک ماشین تراش NC مدل MT11C و یک غلتک که از فولاد SPK ساخته شد، استفاده گردید. به منظور عدم ارتعاش و پس زدگی غلتک در حین آزمایش‌ها یک نگه‌دارنده به طور مناسب بر روی آن مونتاژ و تعبیه گردید تا غلتک به راحتی بتواند توسط ابزار گیر دستگاه تراش در جای خود محکم شود. جنس مندرل (قالب) به دلیل بالا بودن دمای آزمایش از فولاد گرم‌کار انتخاب و ساخته شد. به منظور اعمال حرارت در طی فرآیند فلوفرمینگ گرم از روش دمش شعله توسط گاز اکسی استیلن استفاده شده است. در شکل ۱ تجهیزات مورد استفاده در جهت انجام فرایند فلوفرمینگ گرم نشان داده شده است.

در این پژوهش از لوله‌های آلومینیومی ۶۰۶۱ اکستروود شده با قطر خارجی ۴۲ میلی‌متر و قطر داخلی ۳۵/۵ میلی‌متر با طول پیش‌فرم ابتدایی ۶۰ میلی‌متر استفاده شد و جهت حذف اثرات تغییر شکل ناشی از عملیات اکستروژن، و یکنواختی ریزساختار نمونه‌ها تحت عملیات حرارتی آنیل در دمای ۵۲۰ درجه سانتی‌گراد برای مدت زمان دو ساعت قرار گرفتند، سپس به آهستگی در هوای آزاد خنک شدند. ترکیب شیمیایی لوله آلومینیومی ۶۰۶۱ در جدول ۱ آورده شده است. شکل‌های (۲-الف) و (۲-ب) هندسه و ابعاد پیش‌فرم‌های مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهند. انتخاب و طراحی غلتک بر اساس پارامترهایی همچون طول و شعاع کارگیر، اندازه ابزار گیر و توان دستگاه تراش صورت می‌پذیرد. غلتک در انتهای خود دارای یک توپی می‌باشد که بدون نیاز به پیچ و مهره و به صورت انطباق پرسی در غلتک جا زده شده است. این



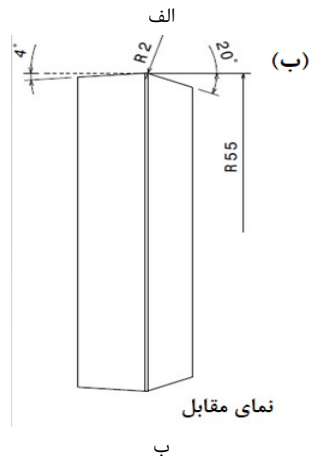
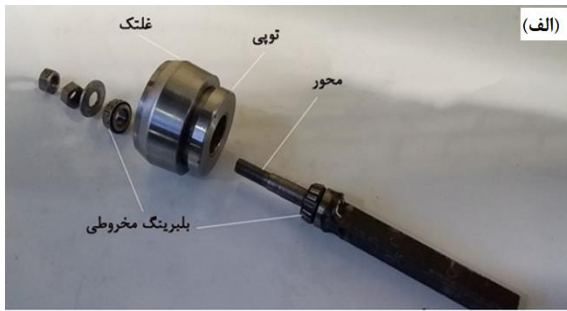
شکل ۱) تجهیزات فرایند فلوفرمینگ مورد استفاده در پژوهش حاضر

پرداختند نتایج نشان می‌دهند که با افزایش میزان کاهش ضخامت لوله، استحکام تسلیم، استحکام نهایی، سختی سطح و پالایش کریستال‌ها (کشیدگی دانه‌ها در جهت حرکت غلتک) افزایش یافت و از طرف دیگر اثرات مغایری بر رشد قطری لوله، دقت هندسی، صافی سطح و هم‌چنین درصد کشیدگی لوله فلوفرم شده می‌گذارد. مطالعه موراتا و همکاران^[9] نشان می‌دهد که فلوفرمینگ لوله منیزیومی AZ3۱ در دمای اتاق منجر به کاهش حد شکل‌دهی و هم‌چنین ترک خوردن در جهت محوری لوله می‌شود. با افزایش دمای شکل‌دهی تا بالاتر از دمای تبلور مجدد علاوه بر حذف ترک‌ها بر روی لوله، حد شکل‌دهی افزایش پیدا کرد. دلایل افزایش حد شکل‌دهی در دماهای بالاتر به افزایش تعداد سیستم‌های لغزش و تسهیل تغییر شکل پلاستیک نسبت داده می‌شود. راجان^[10] عیوب ایجادشده در فلوفرمینگ فولادهای پر استحکام از قبیل ایجاد ترک، رشد قطری، پوسته‌پوسته یا فلسی شدن را بررسی کرده است. گور^[11] در مورد جریان ناپایداری جریان پلاستیک، عوامل موثر و عیوب ناشی از آن در فلوفرمینگ کار کرده است. محبی و اکبرزاده^[12] توسط یک پین استوانه‌ای که به صورت طولی و عرضی در قطعه اولیه جاسازی شده بود به اندازه‌گیری کرنش‌های طولی و عرضی ایجادشده در فرآیند فلوفرمینگ پرداختند. نتایج المان محدود حاصل از بررسی این محققان تطابق مناسبی با نیروهای بدست آمده از حالت تجربی را دارد. روی و همکاران^[13] با اندازه‌گیری سختی نقاط مختلف قطعه نهایی، به بررسی میزان کرنش معادل در نقاط مختلف قطعه پرداختند. کمین و همکاران^[14] اثر پارامترهای مختلف بخصوص نرخ پیشروی را بر قطر داخلی و تغییرات ضخامت در قطعه نهایی در فلوفرمینگ با چند غلتک بررسی نمودند و روشی را برای بهینه کردن پارامترهای فرایند برای دستیابی به دقت بیشتر ارائه نمودند. داویدسون^[1, 15] مطالعه‌ای تجربی روی کیفیت قطعات آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ فلوفرم شده انجام داده است.

هر چند تعداد مطالعات قابل‌قبولی در خصوص تولید لوله آلومینیومی به روش فلوفرمینگ سرد گزارش شده است ولی مرور انجام شده بر تحقیقات قبلی حاکی از آن است که در خصوص خواص مکانیکی و دقت ابعادی (تغییرات ضخامت) لوله آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ فلوفرمینگ گرم شده پژوهش خاصی صورت نگرفته است، لذا در پژوهش حاضر به بررسی تجربی فرآیند فلوفرمینگ گرم آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ آنیل شده پرداخته شده است.

۲- مواد و روش‌ها

همان‌طور که قبلاً به آن اشاره شد فرآیند فلوفرمینگ شامل دو نوع فلوفرمینگ مستقیم و معکوس می‌باشد. طراحی و مدل‌سازی در این تحقیق بر اساس فلوفرمینگ معکوس صورت گرفته است. عملیات شکل‌دهی به این صورت انجام گرفت که ابتدا قطعه



شکل ۳ شماتیکی از هندسه و ابعاد گلتک شکل‌دهی و (ب) نمای مونتاژ گلتک شکل‌دهی مورد استفاده برای انجام فلوفرمینگ

تقریبی مورد نظر حرارت داده شده، سپس دمای هر یک به صورت مداوم تا رسیدن به دمای دقیق آزمایش، توسط ترمومتر تماسی اندازه‌گیری شد. با توجه به انتقال حرارت لوله و مندرل با محیط اطراف در حین فرآیند، اندازه‌گیری و کنترل دما در حین شکل‌دهی به منظور انجام دقیق فلوفرمینگ گرم در دمای مورد نظر ضروری می‌باشد که در آزمایش‌ها این کار توسط یک ترمومتر لیزری غیر تماسی، مدل Sinometer bm380 با قابلیت اندازه‌گیری دما بین ۳۰- تا ۵۰۰+ درجه سانتی‌گراد، انجام گرفت. دقت اندازه‌گیری این ترمومتر $\pm 1/5$ درجه سانتی‌گراد می‌باشد و با توجه به غیر ایزوله بودن محیط انجام آزمایش و تبادل حرارت با محیط، تغییرات دمایی ± 10 درجه سانتی‌گراد برای دماهای شکل‌دهی ۲۰۰ و ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد و در دماهای پایین‌تر فلوفرمینگ تلورانس ± 5 درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد.

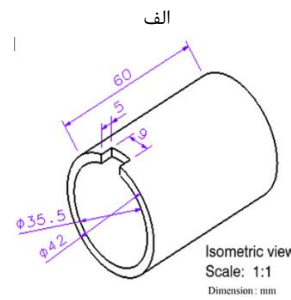
یکی از مهم‌ترین وظایف روان‌کار در طی فرآیند فلوفرمینگ سرد و یا گرم، کاهش اصطکاک بین سطح داخلی لوله و مندرل و در نتیجه سهولت تغییر شکل (جریان یافتن ماده فلوفرم شده) و خروج راحت‌تر لوله فلوفرم شده، پس از پایان عملیات شکل‌دهی می‌باشد. با توجه به این که لوله در اثر فشار گلتک، به شدت به مندرل فشرده شده و امکان چسبیدن لوله به مندرل به وجود می‌آید، باید از یک روان‌کار مناسب در این فرآیند استفاده شود. شکل ۴ انباشته شدن ماده در انتهای لوله فلوفرم شده به دلیل عدم استفاده از روان‌کار مناسب را نشان می‌دهد. به دلیل بالا بودن دمای تغییر

موضوع باعث می‌شود که گلتک با توپی خود بیشترین انطباق را داشته باشد. جنس محور و توپی گلتک مورد استفاده فولاد CK45 و جنس گلتک فولاد SPK انتخاب شده است. گلتک به طور مناسب توسط پیچ‌های ابزار گیر دستگاه تراش در جای خود محکم شد. ابعاد گلتک شکل‌دهی و نمایی از اجزای مونتاژی آن به ترتیب در شکل (۳-الف) و (۳-ب) ارائه شده است.

با توجه به بالا بودن دمای فرآیند فلوفرمینگ گرم در تحقیق حاضر، نیاز به اندازه‌گیری و کنترل درجه حرارت قطعات و فرایند در ابتدا، انتها و حین فرآیند فلوفرمینگ گرم می‌باشد. از طرف دیگر به دلیل آن که آزمایش‌ها برای هر لوله در تعداد پاس‌های مختلف انجام می‌گیرد، ضرورت کنترل و اندازه‌گیری دما بین پاس‌های مختلف به منظور کنترل و جبران کاهش یا افت درجه حرارت در اثر تبادل حرارت با محیط اطراف و رساندن دمای قطعات به دمای مورد نظر دو چندان می‌شود. بدین منظور در این پژوهش از یک ترمومتر تماسی مدل Testo925 برای اندازه‌گیری درجه حرارت در ابتدا و انتهای فرآیند استفاده شد. بطوریکه در ابتدا لوله و مندرل تا دمای

جدول ۱ ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ استفاده شده

عناصر	درصد وزنی
آلومینیوم	۹۷/۶۹
سیلیسیم	۰/۶۲
آهن	۰/۱۴
مس	۰/۲۳
روی	۰/۰۵
منیزیم	۱/۰۸



شکل ۲ پیش‌فرم‌های آلومینیومی ماشین‌کاری شده (الف) نمونه تجربی (ب) شماتیکی از هندسه و ابعاد بر حسب میلی‌متر

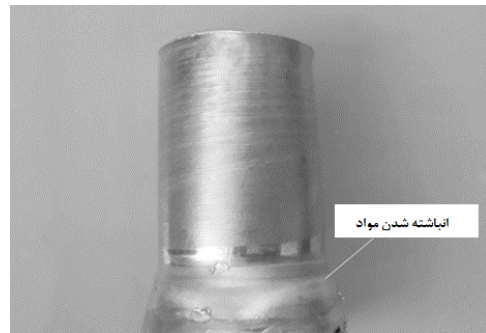
جدول ۲) متغیرهای ورودی و تعداد سطوح

متغیرهای ورودی	سطوح
دمای شکل‌دهی (سانتی‌گراد)	۲۰،۱۰۰،۲۰۰،۳۰۰
درصد کاهش ضخامت	۲۰،۴۰،۶۰
تعداد پاس	۲،۳

به منظور دستیابی به تعداد پاس‌ها مناسب، بحرانی‌ترین حالت ممکن مورد آزمایش قرار گرفت. به طوری که لوله پیش فرم اولیه در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد و تنها در یک پاس تحت ۶۰ درصد کاهش ضخامت قرار گرفت. نتیجه بدست آمده از این آزمایش نشان داد، به دلیل بالا بودن درصد کاهش ضخامت، امکان جریان یافتن ماده فلوفرم شده از بین رفته و ماده به جای جریان یافتن در جهت محوری، در جهت شعاعی جریان می‌یابد و همان طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، غیریکنواختی شدیدی در قطر لوله رخ می‌دهد. به همین دلیل و جهت جلوگیری از غیریکنواختی زیاد در طول ضخامت لوله فلوفرم شده، بایستی تعداد پاس‌ها بیش از یک پاس در نظر گرفته شوند.

با توجه به این موضوع که کلیه آزمایش‌ها در ۲ و ۳ پاس انجام شد، مقدار بار اعمال شده در هر پاس برای هر یک از مقادیر درصد کاهش ضخامت ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد توسط تکیه‌گاه دستگاه تراش اعمال شد. در کلیه آزمایش‌ها میزان سرعت دورانی و نرخ پیشروی ثابت و به ترتیب ۷۱۰ دور بر دقیقه و ۰/۱۹ میلی‌متر بر دور لحاظ گردید که در آزمایش‌های اولیه بهترین مقادیر این پارامترها در شرایط شکل‌دهی مورد نظر بود. کلیه نمونه‌های آزمایش شده پس از فلوفرمینگ گرم در دماهای شکل‌دهی ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد به سرعت از داخل مندرل خارج شده و در آب خنک شدند. برای طراحی آزمایش از نرم‌افزار مینی تب و روش طراحی آزمایش فول‌فاکتوریل استفاده گردید.

پس از انجام فرآیند فلوفرمینگ، جهت بررسی خواص مکانیکی مانند استحکام تسلیم، نهایی و شکل‌پذیری، لوله‌ها شکل‌دهی



شکل ۴) انباشته شدن مواد در انتهای لوله فلوفرم شده گرم به دلیل افزایش اصطکاک ناشی از انتخاب نامناسب روان کار

شکل و افزایش اصطکاک میان سطح داخلی لوله و مندرل، تغییر شکل و جریان یافتن لوله سخت‌تر شده و در نتیجه مواد در انتهای لوله انباشته می‌شوند. در این پژوهش به منظور دستیابی به روان کار مورد نظر، چندین آزمایش با روان کارها و درصد‌های مختلف انجام گرفت. از ترکیب روغن و گرافیت برای روان کاری در دماهای پایین استفاده شد. در دماهای بالا به دلیل افزایش اصطکاک بین سطح داخلی لوله و مندرل و سخت‌تر شدن جریان لوله و از طرفی بخار شدن روغن در دماهای بالا، استفاده از این روان کار در طی فرآیند شکل‌دهی ممکن نبود و لذا از گریس نسوز Lithplex R3 با قابلیت تحمل دما تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد استفاده شد.

جهت بررسی کامل فرآیند و کنترل مناسب پارامترهای فرآیندی آن، نیاز به آزمایش‌های متعددی می‌باشد و اگر برای کاهش تعداد آزمایش‌ها فقط چند سطح از هر متغیر مورد بررسی قرار گیرد، تعداد آزمایش‌ها با افزایش تعداد متغیرها به شکل صعودی افزایش می‌یابد که این تعداد آزمایش‌ها نیز توجیه‌پذیر نیست. بنابراین یکی از اهداف اصلی طراحی آزمایش‌ها انتخاب مهم‌ترین حالات آزمایشی است که با استفاده از آن بتوان فرآیند را به بهترین نحو بررسی کرد و درعین حال تعداد آزمایش‌ها توجیه‌پذیر باشد.

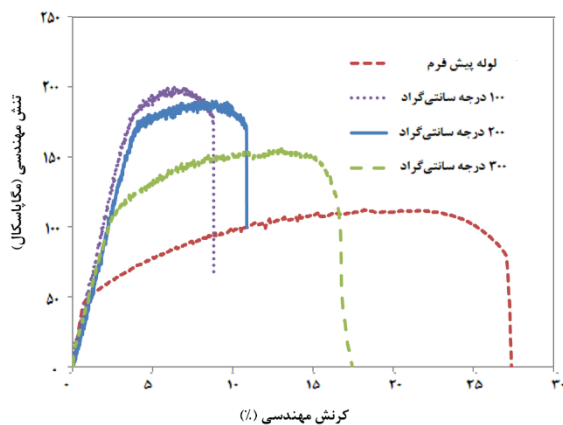
در این تحقیق پارامترهای نظیر دمای شکل‌دهی، درصد کاهش ضخامت و تعداد پاس به عنوان متغیرهای ورودی و دقت ابعادی (درصد تغییرات ضخامت) و خواص مکانیکی (تنش تسلیم، تنش نهایی و شکل‌پذیری) به عنوان متغیرهای خروجی برای بررسی تجربی فرآیند فلوفرمینگ آلومینیوم ۶۰۶۱ آنیل شده در دمای بالای تغییر شکل استفاده شد. در ابتدا با انجام چندین آزمایش اولیه به یافتن تعداد و مقادیر هر یک از سطوح متغیرها پرداخته شد. یکی از مهم‌ترین عوامل در انتخاب سطوح متغیرها، محدودیت توان دستگاه تراش به منظور انجام آزمایش‌ها بود. یکی دیگر از دلایل انتخاب این سطح از متغیرها، نتایج به دست آمده از تحقیقات پیشین با توجه به اولویت تأثیرگذاری هر یک از پارامترها بود. با توجه به این‌که دمای کار گرم آلومینیوم زیر دمای تبلور مجدد (حدود ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد) می‌باشد، پارامترها و سطوح در نظر گرفته شده برای آزمایش‌ها در این تحقیق در جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۵) غیریکنواختی شدید و رشد قطری لوله به دلیل افزایش درصد کاهش ضخامت و کافی نبودن یک پاس برای شکل‌دهی



شکل ۷ لوله‌های تولیدشده از لوله پیش فرم ابتدایی در پاس‌های مختلف فلوفرمینگ گرم
 همچنین با افزایش دمای شکل‌دهی از ۲۰ درجه سانتی‌گراد به ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد، استحکام تسلیم و نهایی کاهش‌یافته و شکل‌پذیری افزایش پیدا کرده است. این موضوع به اثرات کارسختی در حین شکل‌دهی قطعه مربوط می‌گردد که در دماهای بالای شکل‌دهی تا حدودی با فعال شدن سازوکارهای نرم شوندگی اثرات سخت شوندگی کاهش می‌یابد. ولی به دلیل بالا نبودن دمای تغییر شکل (بالتر از دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد) و عدم وقوع سازوکارهای نرم شوندگی غالب مانند تبلور مجدد دینامیکی، همچنان سازوکارهای سخت شوندگی مانند کارسختی بر کارنرمی غالب بوده و مکانیزم غالب سخت شوندگی می‌باشد و این امر افزایش استحکام و کاهش شکل‌پذیری لوله تغییر شکل داده‌شده را حتی در دمای تغییر شکل بالای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد به همراه دارد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش دمای شکل‌دهی به دلیل فعال شدن سازوکارهای نرم شوندگی مانند بازیابی استحکام لوله فلو فرم شده کاهش می‌یابد، بطوریکه اختلاف تغییرات استحکامی بین دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد و دیگر دماها محسوس تر می‌باشد. یعنی به دلیل وقوع بازیابی دینامیکی در ساختار، اندکی از سخت شوندگی در ساختار کاسته شده و در مجموع استحکام تسلیم و نهایی کاهش می‌یابد.



شکل ۸ اثر دمای فلوفرمینگ بر منحنی‌های تنش-کرنش مهندسی لوله شکل‌دهی شده در دو پاس و با کاهش ضخامت ۶۰٪

شده به منظور انجام آزمایش کشش طبق استاندارد ASTM E8M با طول گیج ۲۵ میلی‌متر توسط دستگاه وایرکات همان‌طور که در شکل ۶ مشخص است برش داده شدند. برای انجام آزمایش‌های کشش از دستگاه ۲۵۰ تنی و با سرعت ۱mm/min استفاده شد. همچنین جهت تعیین سختی قطعات شکل داده‌شده از آزمایش ریز سختی بر اساس معیار ویکرز با اعمال مقدار نیروی ۲۰۰ گرم برای مدت زمان ۱۰ ثانیه استفاده شد. به این منظور، نمونه‌هایی از قسمت میانی لوله‌های فلوفرمینگ شده برش خورده و پس از سمباده‌زنی و پولیش کردن مقادیر ریزسختی اندازه‌گیری شد. برای هر یک از نمونه‌ها، مقدار ریزسختی در راستای ضخامت لوله و در سه سطح بالا، مرکز و پایین نمونه اندازه‌گیری شد و سپس میانگین آن به عنوان مقدار ریزسختی ویکرز قطعه ثبت شد. با توجه به این‌که متغیرهای زیادی بر رفتار جریان ماده در طی فرآیند فلوفرمینگ گرم تأثیر می‌گذارند لذا پس از فلوفرمینگ لوله، یک غیریکنواختی محسوس در ضخامت نمونه‌ها مشاهده می‌شود. در این مطالعه تغییرات ضخامت به عنوان اختلاف بین حداکثر و حداقل ضخامتی که در طول نمونه فلوفرم شده وجود دارد تعریف می‌گردد که با استفاده از یک میکرومتر با دقت ۰/۰۰۲ میلی‌متر ضخامت لوله اندازه‌گیری می‌شود.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- لوله‌های تولیدشده به روش فلوفرمینگ گرم

در شکل ۷ نمونه‌های از لوله‌هایی که توسط فرآیند فلوفرمینگ گرم در درصد کاهش‌های ضخامت مختلف شکل‌دهی شده، مشاهده می‌گردد. همان‌طور که مشاهده می‌شود لوله پیش‌فرم شده می‌تواند در سه مرحله و با درصدهای کاهش ضخامت به ترتیب ۲۰٪، ۴۰٪ و ۶۰٪ به لوله فلوفرم شده مدنظر تبدیل گردد.

۳-۲- اثر دما و درصد کاهش ضخامت بر استحکام و شکل‌پذیری

شکل ۸ اثر دما بر منحنی تنش-کرنش مهندسی و خواص استحکامی و شکل‌پذیری لوله فلوفرم شده گرم را در مقایسه با لوله ابتدایی نشان می‌دهد. همان‌طور که از منحنی‌های این نمودار مشخص است، در تمامی دماهای تغییر شکل، بطور محسوس استحکام لوله فلوفرم شده از لوله تغییر شکل داده نشده بیشتر است درحالی‌که شکل‌پذیری آن به سرعت کاهش یافته است.



شکل ۹ برخی نمونه‌های آزمایش کشش برش داده‌شده از لوله فلوفرم شده

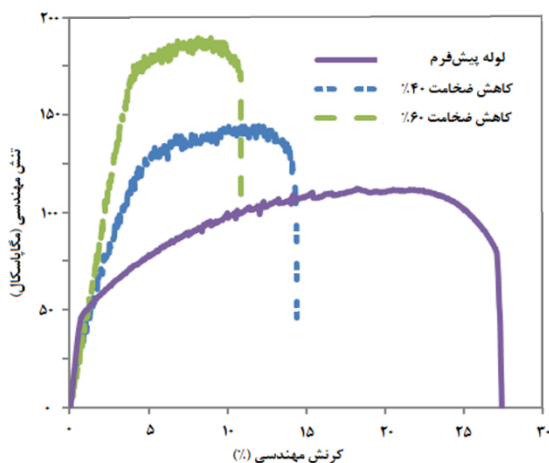
شکل ۱۱ اثر درصد کاهش ضخامت بر روی خواص استحکامی و شکل‌پذیری لوله شکل‌دهی شده در دو پاس شکل‌دهی و دمای فلورمینگ ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. همان‌طور که از منحنی‌های این نمودار مشخص است با افزایش درصد کاهش ضخامت تا ۶۰٪، استحکام تسلیم و نهایی نسبت به لوله آنبیل شده ابتدایی افزایش یافته و از طرفی میزان شکل‌پذیری کاهش پیدا کرده است.

این تغییرات مقدار استحکام و شکل‌پذیری به خوبی بیانگر آثار فرآیند فلورمینگ بر خواص استحکامی ماده می‌باشد. افزایش استحکام و کاهش شکل‌پذیری به کارسختی در حین فرآیند مربوط می‌شود. در واقع کرنش‌های شدید بر روی سطح منجر به کشیده شدن دانه‌ها در جهت محوری شده و این موضوع باعث تلاقی نابعایی‌ها با یکدیگر و افزایش چگالی تراکم آن‌ها می‌شود در ادامه به دلیل افزایش چگالی نابعایی‌ها در جهت شکل‌دهی، یک خواص ترجیحی به وجود می‌آید که منجر به افزایش استحکام در این جهت می‌شود. هم‌چنین دلیل دندانه‌دار شدن نمودار در ناحیه پلاستیک، به کرنش‌های شدید در طی فرآیند فلورمینگ نسبت داده می‌شود.

۳-۳- اثر پارامترهای فرایندی بر میکروسختی

همان‌طور که بیان شد افزایش استحکام و سختی قطعه کار بعد از فلورمینگ ناشی از کارسختی انجام شده روی آن، اغلب مطلوب می‌باشد. اگر سختی قطعه پس از شکل‌دهی خیلی افزایش یابد و نیاز به قطعه‌ای با چقرمگی بیشتر باشد می‌توان یک عملیات حرارتی بعدی روی قطعات انجام داد. در قطعات فلورم شده، سختی سطح بیشترین مقدار است [16].

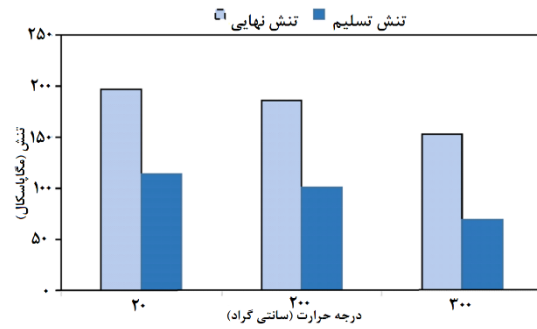
به منظور بررسی صحت توزیع نتایج، نمودار احتمال نرمال داده‌ها با قابلیت ۰/۵ درصد برای میانگین ریزسختی در شکل ۱۲ ارائه شده است. همان‌طور که از این نمودار مشخص است، بین نتایج با خط نرمال گذرانده هم‌خوانی خوبی وجود دارد. بطوریکه مقدار مناسب و کاملاً قابل قبول ۰/۰۲۶ برای P حاصل می‌گردد.



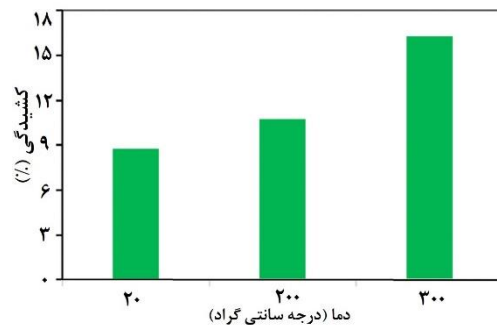
شکل ۱۱ اثر درصد کاهش ضخامت بر منحنی‌های تنش-کرنش مهندسی لوله فلورمینگ شده در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد

شکل ۹ تغییرات تنش تسلیم و نهایی قطعه فلورم شده با افزایش دمای فلو فرمینگ در دو پاس شکل‌دهی و ۶۰٪ کاهش ضخامت را نشان می‌دهد. همان‌طور که از این نمودار مشخص است تنش تسلیم لوله از مقدار ابتدایی ۴۱/۲۶ مگاپاسکال برای لوله تغییر شکل داده نشده به ۶۹/۴۶ مگاپاسکال برای لوله فلورم شده در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد، افزایش یافته است. تنش نهایی نیز از مقدار ابتدایی ۱۱۱/۲ مگاپاسکال به ۱۵۳/۲۸ مگاپاسکال در دمای تغییر شکل ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است. یعنی تنش تسلیم و نهایی به ترتیب در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد ۶۸٪ و ۳۷٪ افزایش داشته است. در حالت کلی نیز مشخص است با کاهش دما فلورمینگ استحکام تسلیم و نهایی لوله شکل داده شده به سرعت افزایش می‌یابد، که ناشی از فعال تر شدن مکانیزم‌های سخت شونده‌گی نسبت به نرم شونده‌گی در دماهای پایین شکل‌دهی می‌باشد.

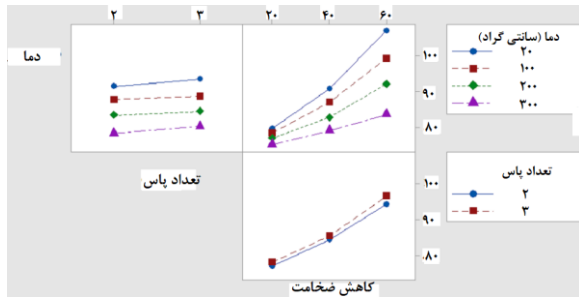
شکل ۱۰ تغییرات درصد افزایش طول بر حسب دما شکل‌دهی برای ۶۰٪ کاهش ضخامت و در دو پاس شکل‌دهی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در نمودار مشخص است با افزایش دمای فلورمینگ از ۲۰ درجه سانتی‌گراد به ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد، درصد افزایش طول نمونه‌های تغییرشکل داده شده افزایش پیدا کرده است، که نشان‌دهنده افزایش اثر نرم شونده‌گی و فعال تر شدن مکانیزم‌های آن مانند نفوذ در ماده با افزایش دمای شکل‌دهی قطعه می‌باشد. هم‌چنین نتایج نشان می‌دهند که شکل‌پذیری لوله فلو فرم شده در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد با درصد کاهش ضخامت ۶۰٪ نسبت به لوله تغییر شکل داده نشده ۶۰/۵۸٪ کاهش می‌یابد.



شکل ۹ تغییرات تنش تسلیم و نهایی قطعه فلورم شده با افزایش دمای فلو فرمینگ در دو پاس شکل‌دهی و ۶۰٪ کاهش ضخامت



شکل ۱۰ تغییرات درصد افزایش طول لوله فلورم شده با افزایش دمای فلو فرمینگ در دو پاس شکل‌دهی و ۶۰٪ کاهش ضخامت

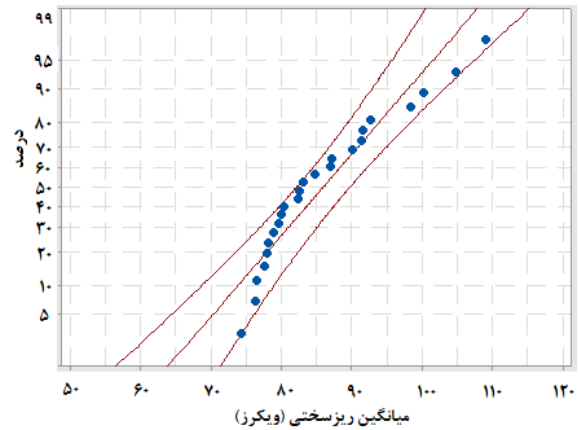


شکل ۱۴) اثر متقابل دما، درصد کاهش ضخامت و تعداد پاس بر میانگین ریزسختی

سانتی‌گراد، فرآیندهای نرم شوندگی نظیر بازیابی دینامیکی فعال‌شده و منجر به کاهش انرژی ساختار و در نتیجه کاهش مقادیر ریزسختی می‌شوند. مقادیر ریزسختی با افزایش دما تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد کاهش پیدا می‌کنند اما همچنان سختی بالاتر از سختی نمونه اولیه آنیل شده (۷۰/۶۸ ویکرز) می‌باشد.

نتایج نشان می‌دهند که سختی با افزایش درصد کاهش ضخامت، نسبت به لوله آن یل شده ابتدایی افزایش یافته است. که علت آن افزایش میزان تغییر شکل پلاستیک با افزایش درصد کاهش ضخامت می‌باشد که این امر افزایش کارسختی و استحکام بخشی لوله فلوفرم شده را به همراه دارد. در حقیقت کارسختی به تعامل عیوب کریستالی با یکدیگر مربوط بوده و این عامل با افزایش درصد کاهش ضخامت لوله به دلیل کرنش‌های شدید روی سطح و کشیدگی دانه‌ها و افزایش چگالی نابجایی تشدید می‌گردد و در نهایت موجب افزایش مقادیر ریزسختی می‌گردد. همان طور که مشخص است پس از اثر متقابل درصد کاهش ضخامت و دما، اثرات متقابل درصد کاهش ضخامت و تعداد پاس شکل‌دهی بیشترین اثر را بر میانگین ریزسختی نشان می‌دهد. بطوریکه، مقدار میانگین میکروسختی با افزایش تعداد پاس به میزان اندکی افزایش یافته است. این افزایش اندک ریزسختی را می‌توان ناشی از این موضوع دانست که با افزایش تعداد پاس، نرخ کارسختی افزایش یافته و منجر به افزایش بیشتر چگالی نابجایی‌ها و برخورد نابجایی‌ها با یکدیگر می‌شود. در حقیقت شکل‌دهی در سه پاس باعث افزایش نرخ کارسختی نسبت به دو پاس بوده و این امر منجر به افزایش اندک ریزسختی می‌شود.

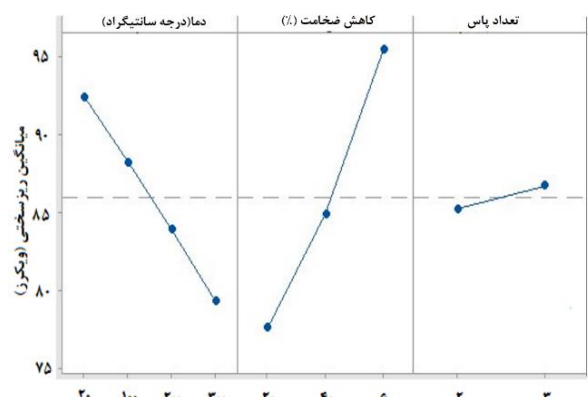
شکل ۱۵ تغییرات ریزسختی را از سطح داخلی لوله به سطح خارجی برای لوله فلوفرم شده در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد و طی سه پاس برای دو درصد کاهش ضخامت ۲۰٪ و ۶۰٪ را نشان می‌دهد. همان طور که از نتایج این نمودار مشخص است میزان ریزسختی از سطح داخلی لوله به سطح خارجی لوله در حال افزایش است. افزایش ریزسختی در سطح خارجی به کرنش‌های شدیدی که در سطح



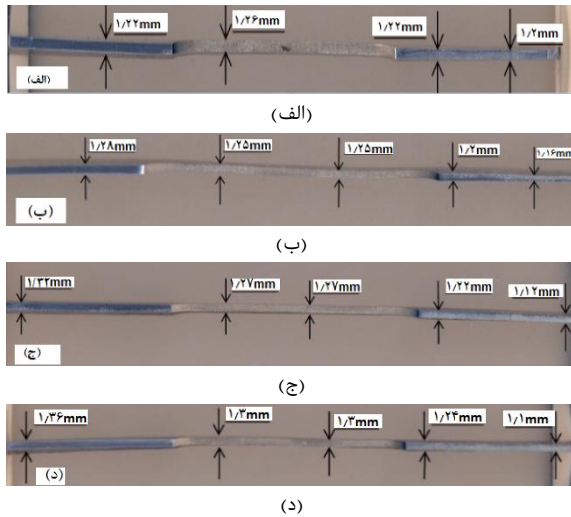
شکل ۱۵) نمودار توزیع صحت نتایج برای میانگین ریزسختی

در شکل ۱۳ اثر پارامترهای اصلی دما، درصد کاهش ضخامت و تعداد پاس بر مقدار میانگین ریزسختی لوله فلوفرم شده نشان داده شده است. همان طور که از این نمودار مشخص است بیشترین اثر بر ریزسختی را به ترتیب درصد کاهش ضخامت، دمای شکل‌دهی دارد و کمترین اثر را تعداد پاس شکل‌دهی داراست. بطوریکه با افزایش درصد کاهش ضخامت میانگین ریزسختی به سرعت افزایش می‌یابد درحالی‌که با افزایش دما میانگین میکروسختی با سرعت کمتری کاهش می‌یابد. درحالی‌که تعداد پاس با کمترین اثر باعث افزایش ناچیز در ریزسختی لوله فلوفرمینگ شده می‌گردد.

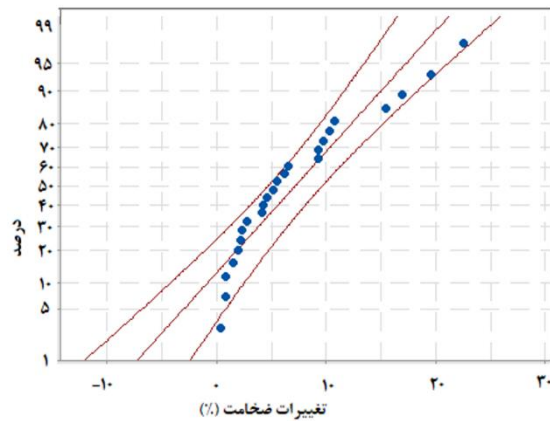
در شکل ۱۴ اثرات متقابل دما، درصد کاهش ضخامت و تعداد پاس بر مقدار ریزسختی لوله فلوفرم شده نشان داده شده است. همان طور که مشخص است بیشترین میزان اثرات ترکیبی بر روی ریزسختی مربوط به اثرات متقابل دما و درصد کاهش ضخامت می‌باشد. به طوری که با افزایش درصد کاهش ضخامت و کاهش دمای شکل‌دهی سختی قطعه به سرعت افزایش می‌یابد. با توجه به این نمودار، با افزایش دمای تغییر شکل، مقادیر ریزسختی (با فرض ثابت بودن درصد کاهش ضخامت) کاهش پیدا می‌کنند. این موضوع را می‌توان به رقابت هم‌زمان کار سختی و کار نرمی ارتباط داد. به طوری که با افزایش دمای شکل‌دهی تا ۳۰۰ درجه



شکل ۱۶) بررسی اثرات اصلی متغیرهای دما، درصد کاهش ضخامت و تعداد پاس بر میانگین ریزسختی



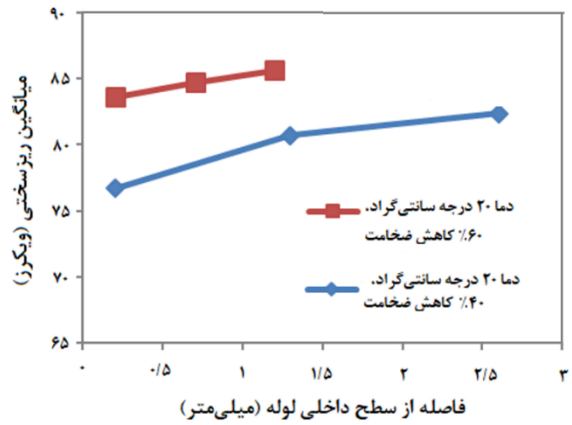
شکل ۱۶ تغییرات ضخامت لوله شکل‌دهی شده با دماهای فلورمینگ (الف) ۲۰°C، (ب) ۱۰۰°C، (ج) ۲۰۰°C و (د) ۳۰۰°C در دو پاس و ۶۰٪ کاهش ضخامت



شکل ۱۷ نمودار توزیع صحت نتایج برای درصد تغییرات ضخامت

واقع شده و بین نتایج با خط بهنجار گذرانده هم‌خوانی خوبی وجود دارد. به طوری که مقدار مناسب و کاملاً قابل قبول ۰/۰۱۳ برای P حاصل می‌گردد. مجموعه این عوامل این حقیقت را روشن می‌سازد که نتایج به‌دست آمده برای درصد تغییرات ضخامت لوله با توزیع بهنجار هم‌خوانی خوبی دارند.

همان‌طور که پیش‌تر به آن اشاره شد با افزایش دما، تغییرات ضخامت لوله به دلیل غیریکنواختی جریان مواد افزایش می‌یابد. با توجه به شکل ۱۸ با افزایش درصد کاهش ضخامت و تعداد پاس، درصد تغییرات ضخامت افزایش می‌یابد. این نتایج در بررسی اثر متقابل پارامترهای ذکر شده نمایان است. به طوری که افزایش هم‌زمان دما و درصد کاهش ضخامت، باعث افزایش شدید درصد تغییرات ضخامت لوله می‌شود. استفاده هم‌زمان از دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد و درصد کاهش ضخامت ۶۰٪ (در سه پاس شکل-دهی)، تغییرات ضخامت لوله را تا ۲۳/۰۷۶٪ افزایش می‌دهد. با افزایش تعداد پاس مشاهده می‌شود، شیب نمودار کمی افزایش‌یافته و تغییرات ضخامت لوله اندکی افزایش می‌یابد. آنچه



شکل ۱۵ تغییرات ریزسختی ویکرز از سطح داخلی به سطح خارجی لوله در سه پاس

خارجی لوله رخ می‌دهد نسبت داده می‌شود. همچنین در اندازه-گیری مقادیر ریزسختی در راستای ضخامت مشاهده شد که با افزایش درصد کاهش ضخامت علاوه بر افزایش مقدار میانگین ریزسختی، میزان انحراف ریزسختی از سطح خارجی به سطح داخلی لوله شکل‌دهی شده کاهش‌یافته و تقریباً به سمت مقدار ثابتی می‌رود. میزان سختی در سطح خارجی و داخلی لوله شکل داده‌شده در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد و کاهش ضخامت ۶۰٪ به ترتیب ۸۵/۶۵ ویکرز و ۸۳/۶ ویکرز اندازه‌گیری شده است یعنی تغییرات ریزسختی از سطح خارجی لوله به سطح داخلی آن حدود ۲/۳۹٪ می‌باشد. درحالی‌که این تغییرات ریزسختی برای کاهش ضخامت ۲۰٪ به حدود ۷/۳۸٪ افزایش می‌یابد.

۳-۴- اثر پارامترهای فرآیندی بر تغییرات ضخامت لوله فلورمینگ شده

با توجه به این‌که متغیرهای زیادی بر رفتار جریان ماده در طی فرآیند فلورمینگ گرم تأثیر می‌گذارند، لذا پس از فلورمینگ لوله یک غیریکنواختی قابل‌ملاحظه‌ای در ضخامت نمونه‌ها مشاهده می‌شود. در این بخش هدف اصلی بررسی روند تأثیرگذاری هر یک از متغیرهای ورودی شامل دما، درصد کاهش ضخامت و تعداد پاس بر درصد تغییرات ضخامت لوله فلورمینگ شده می‌باشد. در ادامه با ارائه نمودارهایی اولویت تأثیرگذاری هر یک از متغیرها، بر تغییرات ضخامت لوله مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در این پژوهش تغییرات ضخامت به عنوان اختلاف بین حداکثر و حداقل ضخامتی که در طول نمونه فلورم شده وجود دارد تعریف شده است. شکل ۱۶ نحوه توزیع ضخامت را در طول نمونه‌های فلورم شده نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است تأثیر دما منجر به افزایش تغییرات ضخامت جداره لوله می‌شود. به طوری که با افزایش دما از ۲۰ درجه سانتی‌گراد تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد (برای ۶۰ درصد کاهش ضخامت و برای دو پاس) تغییرات ضخامت لوله شش برابر افزایش یافته است. به منظور بررسی صحت توزیع نتایج، نمودار احتمال نرمال داده‌ها با قابلیت ۰/۵ درصد ارائه شده است. شکل ۱۷ نشان می‌دهد که نتایج به خوبی در فاصله اطمینان

۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، به بررسی تجربی فرآیند فلوفرمینگ گرم آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ آنیل شده پرداخته شد. اثر مهم‌ترین پارامترهای فرآیندی نظیر دما، درصد کاهش ضخامت و تعداد پاس بر روی خواص مکانیکی و تغییرات ابعادی لوله تغییر شکل داده شده مورد بررسی دقیق قرار گرفت. بر اساس مشاهدات تجربی، نتایج به دست آمده در این تحقیق را می‌توان به صورت زیر دسته‌بندی کرد:

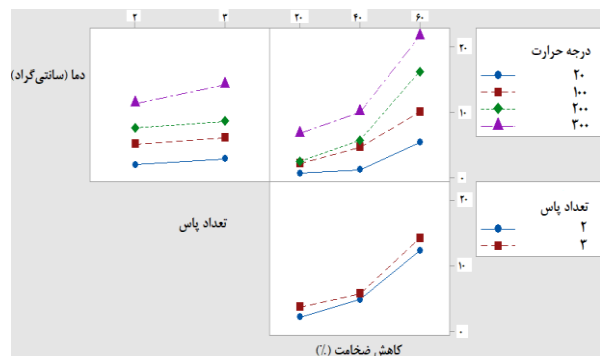
۱- انجام فرآیند فلوفرمینگ باعث افزایش استحکام و کاهش شکل‌پذیری لوله در تمامی دماها، درصدهای کاهش ضخامت و پاس‌های شکل‌دهی، نسبت به لوله ابتدایی می‌گردد. اما با افزایش دمای شکل‌دهی از ۲۰ به ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد، درصد کشیدگی لوله شکل داده شده افزایش و استحکام آن کاهش می‌یابد. درحالی‌که با افزایش درصد کاهش ضخامت از ۲۰٪ تا ۶۰٪ در یک دمای ثابت شکل‌دهی، میزان استحکام لوله شکل داده شده افزایش و شکل‌پذیری آن کاهش می‌یابد. به طوری که در فلوفرمینگ با دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد، و درصد کاهش ضخامت ۶۰٪ و در دو پاس، استحکام تسلیم و نهایی به ترتیب ۶۸٪ و ۳۷٪ افزایش یافته و شکل‌پذیری ۶۰/۵۸٪ کاهش یافته است.

۲- مقادیر میانگین ریزسختی لوله‌های فلوفرمینگ شده با افزایش دمای شکل‌دهی کاهش می‌یابد درحالی‌که این مقادیر با افزایش درصد کاهش ضخامت از ۲۰٪ به ۶۰٪ در یک دمای شکل‌دهی مشخص به سرعت افزایش می‌یابد. بطوریکه مقادیر میانگین ریزسختی برای نمونه ابتدایی به ازای ۲۰٪، ۴۰٪ و ۶۰٪ کاهش ضخامت در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب ۱۳/۰۵٪، ۲۹/۲۱٪، ۵۴/۱۴٪ افزایش را ایجاد می‌کند درحالی‌که در دمای شکل‌دهی ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد افزایش درصد کاهش ضخامت ۲۰٪، ۴۰٪ و ۶۰٪ به ترتیب افزایش ۷/۸٪، ۱۳/۵۱٪ و ۱۹/۷۶٪، در مقادیر میانگین ریزسختی قطعه شکل داده شده را نسبت به لوله فلوفرم نشده ایجاد می‌کند. در اندازه‌گیری مقادیر ریزسختی در راستای ضخامت مشاهده شد که با افزایش درصد کاهش ضخامت علاوه بر افزایش مقدار میانگین ریزسختی، میزان انحرافات ریزسختی از سطح خارجی به سطح داخلی لوله شکل‌دهی شده کاهش یافته و تقریباً به مقدار ثابتی می‌رسد. برای دمای فلوفرمینگ ۲۰ درجه سانتی‌گراد و کاهش ضخامت ۶۰٪ میزان ریزسختی در سطح خارجی و داخلی لوله به ترتیب ۸۵/۶۵ و ۸۳/۶ می‌گردد. ویکرز که نشان از تغییرات ریزسختی در طول ضخامت لوله دارد. درحالی‌که تغییرات ریزسختی در طول ضخامت لوله در همین دما و کاهش ضخامت ۲۰٪ به ۷/۳۸٪ افزایش یافته در عین حالی که مقادیر سختی کاهش می‌یابد.

۳- افزایش هم‌زمان دما، درصد کاهش ضخامت و تعداد پاس منجر به تغییرات شدید ضخامت لوله می‌شوند، به طوری که استفاده هم‌زمان از دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد و درصد کاهش ضخامت ۶۰٪ (برای سه پاس شکل‌دهی)، تغییرات ضخامت لوله

از نتایج تجربی مشهود است با افزایش دمای شکل‌دهی برای درصدهای کاهش ضخامت ۲۰٪ و ۴۰٪ و ۶۰٪ تغییرات ضخامت لوله افزایش یافته است. دلیل تغییرات ضخامت لوله در دمای بالا به غیریکنواختی و سخت‌تر شدن کنترل جریان ماده در طی فلوفرمینگ لوله مربوط می‌گردد. در واقع با افزایش دما از ۲۰ به ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد به دلیل تسهیل سیلان ماده و عدم کنترل جریان ماده در طی فرآیند فلوفرمینگ گرم، امکان جریان یافتن مواد در جهت قطری لوله فراهم شده و لذا تغییرات ضخامت نسبت به دمای محیط بیشتر می‌شود.

همان‌طور که از نتایج مشخص است بیشترین میزان اثرات ترکیبی بر تغییرات ضخامت مربوط به اثرات متقابل دما و درصد کاهش ضخامت می‌باشد. به طوری که با افزایش درصد کاهش ضخامت و دمای شکل‌دهی تغییرات ضخامت لوله فلوفرم شده به سرعت افزایش می‌یابد. در واقع با افزایش درصد کاهش ضخامت برای تمامی دماهای شکل‌دهی، درصد تغییرات ضخامت افزایش یافته است. در حقیقت با افزایش میزان کاهش ضخامت، حجم ماده جابجا شده در طول نمونه بیشتر شده و لذا مقاومت ماده در برابر جریان یافتن افزایش یافته و در نتیجه سبب افزایش تغییرات ضخامت دیواره لوله، بین دو ناحیه ضخیم و نازک می‌شود. همان‌طور که از شکل ۱۸ مشخص است، با افزایش دمای فلوفرمینگ از ۲۰ درجه سانتی‌گراد به ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد، اثر درصد کاهش ضخامت بر تغییرات ضخامت لوله به طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد پس از اثر متقابل درصد کاهش ضخامت و دما، اثرات متقابل دما و تعداد پاس شکل‌دهی اثر بیشتری بر تغییرات ضخامت دیواره لوله نشان می‌دهد. شکل ۱۸ اثر تعداد پاس شکل‌دهی را بر درصد تغییرات ضخامت لوله فلوفرمینگ شده و برای کاهش ضخامت‌های ۲۰٪، ۴۰٪ و ۶۰٪ نشان می‌دهد. مشخص است که با افزایش تعداد پاس‌های شکل‌دهی از دو به سه، کارسختی صورت گرفته روی سطح بالا رفته و لذا مقاومت ماده در برابر جریان یافتن افزایش یافته و در نتیجه تغییر شکل در سه پاس منجر به افزایش اندکی در تغییرات ضخامت دیواره لوله می‌شود.



شکل ۱۸) اثرات متقابل دما، درصد کاهش ضخامت و تعداد پاس بر تغییرات ضخامت لوله شکل‌دهی شده

- 11- Gur M, Tirosh J. Plastic flow instability under compressive loading during shear spinning process. *Trans. of the ASME, J. Eng. Ind.* 104 17 22, 1982.
- 12- Mohebbi MS, Akbarzadeh A. Experimental study and FEM analysis of redundant strains in flow forming of tubes. *Journal of Materials Processing Technology.* 2010;210(2):389-95.
- 13- Roy MJ, Klassen RJ, Wood JT. Evolution of plastic strain during a flow forming process. *Journal of Materials Processing Technology.* 2009;209(2):1018-25.
- 14- Kemin X, Yan L, Xianming Z. A study of the rational matching relationships amongst technical parameters in stagger spinning. *Journal of materials processing technology.* 1997;69(1-3):167-71.
- 15- Davidson MJ, Balasubramanian K, Tagore GR. An experimental study on the quality of flow-formed AA6061 tubes. *Journal of materials processing technology.* 2008;203(1-3):321-5.
- 16- Davidson MJ, Balasubramanian K, Tagore GR. Surface roughness prediction of flow-formed AA6061 alloy by design of experiments. *Journal of materials processing technology.* 2008;202(1-3):41-6.

را تا ۲۳/۰۷۶٪ افزایش می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که دمای شکل‌دهی بیشترین اثر را بر تغییرات ضخامت لوله فلوفرمینگ شده داشته و پس از آن درصد کاهش ضخامت بیشترین اثرگذاری را خواهد داشت.

تشکر و قدردانی: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

تأییدیه اخلاقی: محتویات علمی و ادبی مقاله نتیجه‌ی فعالیتی پژوهشی نویسندگان بوده است

تعارض منافع: هیچ‌گونه تعارض منافی وجود ندارد.

سه‌م نویسندگان: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

منابع مالی: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

منابع

- 1- Davidson MJ, Balasubramanian K, Tagore GR. Experimental investigation on flow-forming of AA6061 alloy—a Taguchi approach. *Journal of materials processing technology.* 2008;200(1-3):283-7.
- 2- Cao Z, Wang F, Wan Q, Zhang Z, Jin L, Dong J. Microstructure and mechanical properties of AZ80 magnesium alloy tube fabricated by hot flow forming. *Materials & Design.* 2015;67:64-71.
- 3- Nakasato S, Kobayashi J, Itoh G. Hot spinning formability of aluminum alloy tube. *Procedia Manufacturing.* 2018;15:1263-9.
- 4- De TN, Podder B, Hui NB, Mondal C. Experimental study and analysis of surface roughness of the flow formed H30 alloy tubes. *Materials Today: Proceedings.* 2021;38:3190-7.
- 5- Ebrahimi M, Tabei KH, Naseri R, Djavanroodi F. Effect of flow-forming parameters on surface quality, geometrical precision and mechanical properties of titanium tube. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering.* 2018;232(6):702-8.
- 6- Xiao G, Zhu N, Long J, Xia Q, Chen W. Research on precise control of microstructure and mechanical properties of Ni-based superalloy cylindrical parts during hot backward flow spinning. *Journal of Manufacturing Processes.* 2018;34:140-7.
- 7- Haghshenas M, Klassen RJ. Mechanical characterization of flow formed FCC alloys. *Materials Science and Engineering: A.* 2015;641:249-55.
- 8- Molladavoudi HR, Djavanroodi F. Experimental study of thickness reduction effects on mechanical properties and spinning accuracy of aluminum 7075-O, during flow forming. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* 2011;52(9-12):949-57.
- 9- Murata M, Kuboki T, Murai T. Compression spinning of circular magnesium tube using heated roller tool. *Journal of materials processing technology.* 2005;162:540-5.
- 10- Rajan KM, Narasimhan K. An investigation of the development of defects during flow forming of high strength thin wall steel tubes. *Practical Failure Analysis.* 2001;1(5):69-76.