

بررسی تجربی و بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر بر فلوفرمینگ لوله‌های آلیاژ آلومینیوم AA7075

محمد مهدی سمندری
علی حاجی صادقیان
مهران محبوب خواه

دانشجوی کارشناسی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز
دانشجوی کارشناسی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز
استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز

چکیده

فلوفرمینگ یا اسپینینگ لوله فرآیندی با توانایی ذاتی بالا در تولید انعطاف‌پذیر قطعات لوله‌ای دقیق، جدار نازک، با صافی سطح بالا و خواص مکانیکی بهبود یافته است. در این مقاله روش بهبود کیفیت لوله‌های فلوفرم شده‌ی آلیاژ آلومینیوم AA7075، به‌طور تجربی بررسی شده است. با استفاده از طراحی آزمایش به روش تاگوچی و آنالیز واریانس، تأثیر مهمترین پارامترهای فرآیند از قبیل نرخ تغذیه، درصد کاهش ضخامت، تعداد گذر(پاس)، ضخامت اولیه، سرعت اسپیندل و زاویه‌ی ورود ابزار، روی پارامترهای اصلی تعیین کننده‌ی کیفیت لوله‌ها از قبیل دقت هندسی و ابعادی، سختی، صافی سطح و ایجاد عیوب، بررسی شده است. نتایج تحقیقات نشان می‌دهند که نرخ پیشروی، درصد کاهش ضخامت و تعداد گذر(پاس) بیشترین تأثیر را روی کیفیت قطعه می‌گذارند. با کاهش نرخ پیشروی و افزایش تعداد گذرها(پاس‌ها)، گردی، صافی سطح، سختی و درصد کاهش ضخامت مؤثر افزایش می‌یابند و کیفیت قطعه بهتر خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: فلوفرمینگ، آلیاژ آلومینیوم AA7075، آنالیز واریانس، متوسط نتایج، فلسی شدن.

Experimental Investigation and Optimization of Effective Parameters on Flowforming of AA7075 Al Alloy Tubes

M. M. Samandari B.Sc. Student, Faculty of Mechanical Engineering,
University of Tabriz
A. Hajisadeghian B.Sc. Student, Faculty of Mechanical Engineering,
University of Tabriz
M. Mahboubkhah Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering,
University of Tabriz

Abstract

Flowforming or tube spinning is a process with high inherent potential in flexible fabrication of high-precision thin-walled tube with high surface finish and improved mechanical properties. In this paper, quality improvement method of flowformed AA7075 aluminium alloy tubes, has been investigated experimentally. Using design of experiment with Taguchi method and analysis of variance, effects of most important input parameters, such as feed rate, percentage of thickness reduction, number of passes, initial thickness, speed of rotation and entrance angle on major quality parameters of tubes, such as geometrical and dimensional accuracy, hardness, surface finish and creation of defect, have been studied. It is found that most effective factors on quality of parts are feed rate, reduction and number of passes. Decreasing the feed rate and increasing the number of passes, result in upper hardness and effective percentage of thickness reduction, better roundness, surface finish and part quality.

Keywords: Flow forming, AA7075 Aluminum alloy, Analysis of variance, Average-of-result, Fish scaling

۱- مقدمه

چرخش که روی مندرل بسته شده است، باعث می‌شود مواد تحت فشار زیر غلتک، تنشی بالاتر از حد تسلیم خود را تجربه کنند و جریان پیدا کنند. 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 پرفرم، می‌شود. بنابراین ضخامت قطعه‌ی نهایی وابسته به فاصله میان غلتک و مندرل بوده و طول آن با قانون حجم ثابت بدست می‌آید. بر اساس ارتباطی که بین جهت جریان فلز و جهت حرکت ابزار در فلوفرمینگ وجود دارد، دو روش فلوفرمینگ به کار برده می‌شود: فلوفرمینگ مستقیم که در آن جهت جریان با جهت حرکت ابزار یکسان است و فلوفرمینگ معکوس که در آن جهت جریان عکس جهت حرکت ابزار می‌باشد [۷].

۳- کار عملی

به طوری که اشاره شد در این تحقیق برای بررسی پارامترهای تأثیرگذار روی فرآیند فلوفرمینگ لوله از آزمایشهای عملی استفاده شده است، که در ادامه به مراحل انجام آنها پرداخته می‌شود.

۳-۱- روش، تجهیزات و شرایط آزمایش

در کار حاضر عملیات فلوفرمینگ به صورت مستقیم و با استفاده از یک غلتک روی دستگاه تراش معمولی به عنوان ماشین فلوفرمینگ، انجام شده است (شکل ۱). غلتک و مندرل مورد استفاده از فولاد ابزار ساخته شده است و برای رسیدن به سختی مناسب عملیات حرارتی سخت کردن روی آنها انجام گرفته است. سپس غلتک روی یک هولدر به طور مناسب مونتاژ شده است تا بتواند به راحتی توسط ساپورت دستگاه تراش محکم شود. ابعاد مربوط به غلتک در جدول ۱ داده شده است.



شکل ۱- فرآیند فلوفرمینگ روی دستگاه تراش

جدول ۱- مشخصات غلتک

شعاع (mm)	زاویه پستی (°)	زاویه ریش (°)	قطر (mm)
۵	۳	۲۷	۹۷

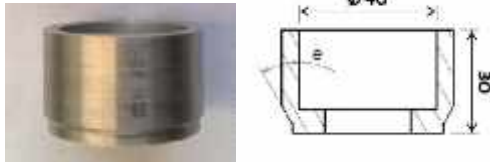
فلوفرمینگ نوعی شکل‌دهی چرخشی موضعی است که در آن لوله‌هایی با نسبت طول به قطر بالا تولید می‌شوند و معمولاً این قطعات، نهایی یا نزدیک نهایی می‌باشند. دقت بالای این فرآیند عملیات سنگ‌زنی داخلی و ماشین کاری به منظور بالانس کردن، گرد کردن و هم مرکز کردن را حذف می‌کند. علاوه بر آن خواص مکانیکی بهبود یافته، نیاز به انجام عملیات برای افزایش خواص را محدود می‌کند و بنابراین این فرآیند را از نظر اقتصادی مناسب می‌سازد. روی [۱] توزیع کرنش پلاستیک طی فرآیند فلوفرمینگ را با اندازه گیری میکروسختی تعیین کرده است. لین [۲] پارامترهای مربوط به فرآیند اسپارک را با روش تاگوچی بهینه‌سازی کرده است. گوپالسامی [۳] هم طی تحقیقاتی، بهینه‌سازی پارامترهای ماشین کاری فولاد سخت شده را با روش تاگوچی و آنالیز واریانس انجام داده است.

پارامترهای زیادی روی کیفیت قطعه‌ی حاصل از فلوفرمینگ مؤثرند، اما آنچه اهمیت زیادی دارد آن است که اثر ترکیبی این پارامترها بسیار پیچیده و کنترل آن مشکل است. تحقیقات متعددی روی کیفیت قطعات فلوفرم شده انجام شده است. گور [۴] در مورد ناپایداری جریان پلاستیک، عوامل مؤثر و عیوب ناشی از آن در فلوفرمینگ کار کرده است. راجان [۵] عیوب ایجاد شده در فلوفرمینگ فولادهای پر استحکام از قبیل ایجاد ترک، رشد قطری، پوسته پوسته یا فلسی شدن^۱ و غیره را بررسی کرده است. فاضلی [۶] پارامترهای فلوفرمینگ ترمومکانیکی را با روش طراحی آزمایش روی زبری آلیاژ آلومینیوم AA2024 بررسی کرده است. داویدسون [۹،۸،۷] مطالعه‌ای تجربی روی کیفیت قطعات آلیاژ آلومینیوم AA6061 فلوفرم شده انجام داده است. اما تا کنون تأثیر ترکیبی مهمترین پارامترهای فرآیند فلوفرمینگ با استفاده از روش تاگوچی و آنالیز واریانس روی تمام ویژگی‌های اصلی تعیین کننده کیفیت قطعه کار آلیاژ آلومینیوم AA7075 به طور هم‌زمان بررسی نشده است. کار حاضر برای بررسی تأثیر مهمترین پارامترها، با استفاده از طراحی آزمایش، روی خروجی-های اصلی تعیین کننده کیفیت قطعه انجام شده است. هدف این مقاله ارائه‌ی روش‌هایی برای تسلط کلی بر فرآیند فلوفرمینگ می‌باشد.

۲- فرآیند فلوفرمینگ

فلوفرمینگ یک فرآیند شکل‌دهی دقیق و مقرون به صرفه برای تولید قطعات متقارن محوری بدون درز می‌باشد. در این فرآیند، نیروی وارد شده از طرف غلتک‌ها به پرفرم در حال

^۱. Fish scaling



شکل ۲- مشخصات هندسی پرفرم

۳-۳- طراحی آزمایش بر مبنای روش تاگوچی و تحلیل داده‌ها

پارامترهای زیادی روی فرآیند فلوفرمینگ تأثیر می‌گذارند. در روش‌های معمول انجام آزمایش، برای بررسی تأثیر این پارامترها روی خروجی نیاز به انجام تعداد زیادی آزمایش می‌باشد. ولی در این کار برای بررسی و بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند از طراحی آزمایش بر مبنای روش تاگوچی استفاده شده است. در این روش کل فرآیند با انجام تعداد محدودی آزمایش بررسی می‌شود، در حالی که نتایج بدست آمده می‌تواند برای پیش‌بینی صحیح جواب معتبر باشد. علاوه بر آن با استفاده از این روش تأثیر ترکیبی متغیرهای فرآیند بطور همزمان قابل بررسی می‌باشد.

تعداد آزمایش‌ها با دانستن تعداد متغیرهای مورد نظر و همچنین تعداد سطح‌های هر متغیر مشخص می‌شود. علاوه بر آن روش آنالیز واریانس برای تعیین مقدار تأثیر هر پارامتر روی خروجی استفاده می‌شود، و بر اساس آن می‌توان بهینه‌سازی کرده، مقدار پارامتر خروجی را در شرایط بهینه بدست آورد [۷].

پارامترهای در نظر گرفته شده برای آزمایش در این تحقیق در جدول ۳ به همراه سطوح آنها داده شده‌اند. طبق مطالعات پیشین، تأثیر پارامترها تقریباً خطی است [۹، ۸، ۶]، بنابراین با در نظر گرفتن عوامل زمان و هزینه، دو سطح برای هر پارامتر در نظر گرفته شده است. با توجه به تعداد پارامترها و تعداد سطوح، روش تاگوچی جدول L8 را برای انجام آزمایش‌ها ارائه می‌دهد.

جدول ۳- پارامترها و سطوح

پارامترها	سطح پایین	سطح بالا
۱ زاویه ی ورودی (°)	۳۰	۵۰
۲ ضخامت اولیه (mm)	۳	۵
۳ تعداد گذر (پاس)	۳	۴
۴ نرخ تغذیه (mm/ rev)	۰٫۱۲	۰٫۲۴
۵ کاهش ضخامت (%)	۴۰	۶۰
۶ سرعت اسپیندل (rpm)	۴۵	۹۰

برای انجام عملیات فلوفرمینگ، مندرل در داخل سه نظام موقعیت‌دهی می‌شود و سپس قطعه کار روی آن قرار می‌گیرد. فلنج قطعه نیز از یک طرف با پیشانی مندرل و از طرف دیگر توسط دستگاه مرغک محکم می‌شود تا حرکت آن نسبت به مندرل سلب شود. داخل و خارج قطعه به‌طور مناسب با روغن برشی آغشته شده است تا اولاً اصطکاک میان قطعه و ابزار کاهش یافته، همچنین قطعه بتواند به راحتی پس از عملیات از مندرل جدا شود و ثانیاً باعث کاهش گرمای آدیاباتیک ایجاد شده در اثر انجام فرآیند شکل‌دهی شود. عملیات فلوفرمینگ در چند گذر (پاس) انجام می‌شود به‌طوری‌که تعداد گذرها (پاس‌ها) در هر کدام از تست‌ها با توجه به طراحی آزمایش انتخاب می‌شود. بیشترین عمق بار در همهی آزمایش‌ها در گذر (پاس) دوم اعمال شده است.

۳-۲- مشخصات پرفرم

ماده‌ای که برای تحقیق حاضر استفاده شده است آلیاژ پرکاربرد آلومینیوم AA7075 می‌باشد. ترکیب شیمیایی این آلیاژ در جدول ۲ آمده است. آلیاژ آلومینیوم AA7075 نسبت استحکام به وزن بالایی داشته و برای قطعاتی که تنش بالایی را تحمل می‌کنند مناسب است. این آلیاژ در صنایع هوافضا، ساخت محورها و چرخ‌دنده‌ها، صنایع نظامی، قطعات شیراطمینان و غیره کاربرد دارد. با زپخت این آلیاژ (T7351) مقاومت در برابر ایجاد ترک‌های ناشی از خوردگی و تنش بالا می‌رود. برای بهبود خواص مکانیکی و افزایش صافی سطح قطعات تولیدی به این روش، عملیات حرارتی انحلال و پیرسختی می‌تواند روی آن انجام گیرد [۱۰].

پس از ماشین‌کاری قطعه، عملیات حرارتی آنیل کامل روی آن انجام شده است تا شکل‌پذیری جنس قطعه کار بهبود و نیروهای شکل‌دهی کاهش یابد. این عملیات در دمای ۴۱۴°C و به مدت یک ساعت با سرد کردن در کوره انجام گرفته است.

شکل ۲ هندسه‌ی پرفرم را نشان می‌دهد. زاویه‌ی ورودی (e) برای درگیری تدریجی ابزار با قطعه کار می‌باشد و مقدار آن یکی از پارامترهای ورودی است. ضخامت دیواره یا قطر خارجی آن نیز به عنوان پارامتر دیگر ورودی در نظر گرفته شده است.

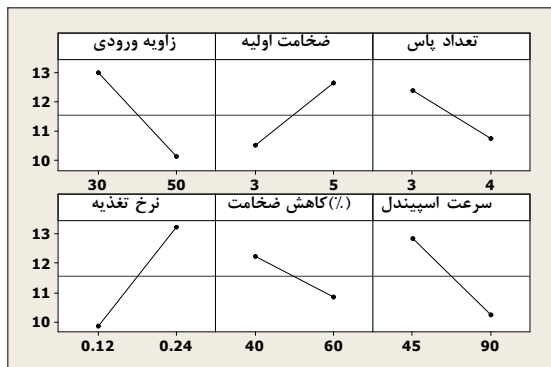
جدول ۲- ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم AA7075

ترکیبات	Cr	Cu	Zn	Mg	Fe
%wt	۰٫۲۴	۱٫۶	۵٫۶	۲٫۴	۰٫۵

جدول ۴- شرایط انجام و نتایج آزمایش

نتایج					سطوح پارامترها					
سختی (HB)	زبری (Ra) (μm)	خطای گردی (mm)	قطر داخلی (mm)	%RE	سرعت اسپیندل	کاهش ضخامت	نرخ تغذیه	تعداد گذر(پاس)	ضخامت اولیه	زاویه ورودی
۸۶	۱,۴۲	۰,۱۳	۴۰,۱۹	۱۲,۵	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۹۳	۱,۸۶	۰,۱	۴۰,۱۹	۱۳	۲	۲	۲	۱	۱	۱
۱۰۷	۱,۹۵	۰,۰۲	۴۰,۳۱	۹	۲	۲	۱	۲	۲	۱
۸۳	۱,۷۶	۰,۰۹	۴۰,۱۷	۱۷,۵	۱	۱	۲	۲	۲	۱
۹۵	۱,۲۶	۰,۰۷	۴۰,۲	۶,۵	۲	۱	۱	۲	۱	۲
۹۲	۱,۵۷	۰,۰۹	۴۰,۲۴	۱۰	۱	۲	۲	۲	۱	۲
۱۰۲	۱,۸۷	۰,۰۸	۴۰,۳	۱۱,۵	۱	۲	۱	۱	۲	۲
۹۲	۱,۷۳	۰,۱۴	۴۰,۱۹	۱۲,۵	۲	۱	۲	۱	۲	۲

مقادیر بدست آمده از آزمایش‌ها برای RE% در جدول ۴ آورده شده‌اند. نتایج بدست آمده از تحلیل «متوسط نتایج» به صورت نموداری در شکل ۳ نشان داده شده‌اند.



شکل ۳- تأثیر پارامترها روی RE%

شکل ۳ تأثیر هر پارامتر را به‌طور جداگانه نشان می‌دهد. آنچه از نمودارها مشخص است، نرخ تغذیه بیشترین تأثیر را روی RE% دارد. می‌توان بدین صورت تحلیل کرد که با افزایش نرخ پیشروی نیروهای شکل‌دهی افزایش یافته و باعث افزایش خیز دستگاه می‌شوند [۱۲]. علاوه بر آن افزایش نرخ پیشروی باعث می‌شود زمان مورد نیاز برای تغییر شکل پلاستیک و جریان فلز تأمین نشده و بنابراین برگشت فنری افزایش می‌یابد [۸]. عامل دیگری که تأثیر زیادی در RE% دارد زاویه‌ی ورودی پرفرم است. این زاویه نیروی وارد بر پرفرم را به دو مولفه تجزیه می‌کند و بنابراین با کاهش زاویه‌ی e، مولفه شعاعی افزایش و مولفه محوری کاهش می‌یابد.

این جدول شامل ترکیبی از سطوح پارامترهای ورودی در ۸ آزمایش می‌باشد [۱۱]. شرایط انجام آزمایش‌ها به همراه نتایج آن در جدول ۴ نشان داده شده است. در کار حاضر برای تحلیل نتایج از «متوسط نتایج» استفاده شده است. در این روش اثر هر پارامتر به صورت «متوسط مقادیری از پارامتر خروجی، که در شرایط ثابتی از پارامتر ورودی مورد نظر بدست آمده‌اند» محاسبه می‌شود [۷]. سپس برای تحلیل هر خروجی از آنالیز واریانس استفاده و مقادیر بهینه‌ی ورودی‌ها برای آنها ارائه شده است.

۴- نتایج و بحث

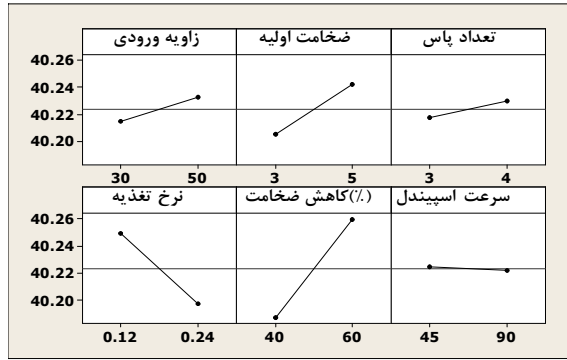
۴-۱- درصد کاهش ضخامت مؤثر

همواره درصد کاهش ضخامت مؤثر کمتر از درصد کاهش ضخامت اعمال شده در قطعه کار می‌باشد. دلایل اصلی چنین اتفاقی، یکی خیز ایجاد شده در اجزای دستگاه به دلیل نیروهای بالای شکل‌دهی و دیگری برگشت فنری ماده‌ی قطعه کار می‌باشد که اثر عامل اول بیشتر است [۱۲و۵]. اگر به طریقی اختلاف درصد کاهش ضخامت اعمال شده از مقدار مؤثر آن مشخص شود، این مقدار می‌تواند برای جبران اثر خیز دستگاه و برگشت فنری، به درصد کاهش ضخامت مورد نیاز اضافه شود تا در نهایت مقدار مطلوب بدست آید.

همان‌طور که از جدول ۳ مشخص است، درصد کاهش ضخامت دارای دو سطح ۶۰ و ۴۰ می‌باشد. بنابراین برای قابل مقایسه بودن نتایج از فرمول زیر استفاده شده است:

$$\text{Relative Error of Reduction (\%RE)} =$$

$$(\%R_{\text{real}} - \%R_{\text{effective}}) / \%R_{\text{real}} \quad (1)$$



شکل ۴- تأثیر پارامترهای روی قطر داخلی (mm)

با افزایش مولفه‌ی شعاعی نیروهای ایجاد کننده خیز، بیشتر می‌شود و کاهش مولفه‌ی محوری، نیروهای لازم برای سیلان فلز را کاهش می‌دهد. بنابراین تغییر شکل به تأخیر افتاده و این تأخیر، با حرکت غلتک به سمت جلو و لغزش آن روی زاویه‌ی ورودی، باعث افزایش فاصله می‌شود و RE% افزایش می‌یابد.

نتایج تحلیل با استفاده از روش آنالیز واریانس، در جدول ۵ داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج با روش تاگوچی تطابق خوبی دارد. مقدار بهینه‌ی پارامترهای ورودی برای کاهش RE% در همان جدول داده شده است. مقدار RE% در شرایط بهینه از ۱۱/۵۶۲٪ (متوسط مقادیر کل آزمایش‌ها)، با افزودن مقدار توزیع مجموع ۰/۰۳٪ که در همان جدول نشان داده شده است، به ۴/۶٪ کاهش می‌یابد که سهم هر کدام از پارامترها برای کاهش آن نیز آورده شده است.

جدول ۵- آنالیز واریانس و شرایط بهینه برای RE%

آنالیز واریانس							شرایط بهینه			
عوامل	درجه آزادی	مجموع مربعات	واریانس	نسبت F	جمع خالص	درصد	مقدار سطح	سطح	سهم عامل	
۱	زاویه ورودی	۱	۱۶,۵۳۱	۱۶,۵۳۱	۶,۵۳۰	۱۴,۰۰۰	۱۸,۹۹۱	۵۰	۲	-۱,۴۳۸
۲	ضخامت اولیه	۱	۹,۰۳۱	۹,۰۳۱	۳,۵۶۷	۶,۵۰۰	۸,۸۱۷	۳	۱	-۱,۰۶۳
۳	تعداد گذر(پاس)	۱	۵,۲۸۱	۵,۲۸۱	۲,۰۸۶	۲,۷۵۰	۳,۷۲۰	۴	۲	-۰,۸۱۳
۴	نرخ تغذیه	۱	۲۲,۷۸۱	۲۲,۷۸۱	۹,۰۰۰	۳۰,۲۵۰	۲۷,۴۶۹	۰,۱۲	۱	-۱,۶۸۸
۵	کاهش ضخامت	۱	۳,۷۸۱	۳,۷۸۱	۱,۴۹۳	۱,۲۵۰	۱,۶۹۵	۶۰	۲	-۰,۶۸۸
۶	سرعت اسپیندل	۱	۱۳,۷۸۱	۱۳,۷۸۱	۵,۴۴۴	۱۱,۲۵۰	۱۵,۲۶۰	۹۰	۲	-۱,۳۱۳
	سایر/خطا	۱	۲,۵۳۰	۲,۵۳۰			۲۴,۰۳۸			
	جمع	۷	۷۳,۷۱۸				۱۰۰,۰۰۰			-۷,۰۰۳

۴-۲- رشد قطری

رشد قطری همواره مشکلی برای انجام فلوفرمینگ، با دقت بالا بوده است. وقتی جریان فلز در جهت شعاعی بیشتر از جهت محوری شود این پدیده اتفاق می‌افتد. یکی از دلایل بیان شده برای غلبه‌ی جریان شعاعی به محوری کاهش نسبت تماس محیطی به محوری (S/L) می‌باشد که توسط گور [۴] بررسی شد.

مقادیر آزمایش‌ها برای قطر داخلی در جدول ۴ داده شده است. نمودارهای حاصل از روش «متوسط نتایج» که در شکل ۴ آمده است، نشان می‌دهند که درصد کاهش ضخامت و نرخ پیشروی بیشترین تأثیر را روی افزایش قطر داخلی از خود نشان می‌دهند. کاهش نرخ تغذیه، جریان مواد در جهت محور را کاهش می‌دهد. افزایش درصد کاهش ضخامت باعث افزایش جریان مواد می‌شود و این مواد جریان یافته که به خاطر نرخ تغذیه‌ی پایین در جهت محوری حرکت نمی‌کنند، در جهت شعاعی سیلان یافته و باعث رشد قطری می‌شوند.

جدول ۶ نتایج آنالیز واریانس را نشان می‌دهد. اندازه‌ی قطر

داخلی در شرایط بهینه‌ی داده شده در این جدول، ۴۰/۱۲۲ میلی‌متر می‌باشد که به اندازه‌ی ۰/۱۰۲ میلی‌متر از مقدار متوسط کاهش یافته است.

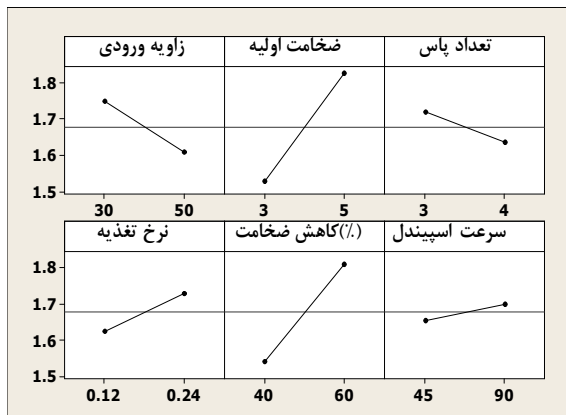
۴-۳- خطای عدم گردی

یکی از مهمترین ویژگی‌های فلوفرمینگ، دقت بالای این فرآیند در ایجاد تolerانس‌های هندسی می‌باشد. استوانه‌ای بودن مهمترین تolerانس هندسی برای قطعات متقارن محوری است. در کار حاضر، خطای عدم گردی در چهار مقطع هر نمونه اندازه‌گیری شده و میانگین آنها به عنوان خطای عدم گردی در نظر گرفته شده است.

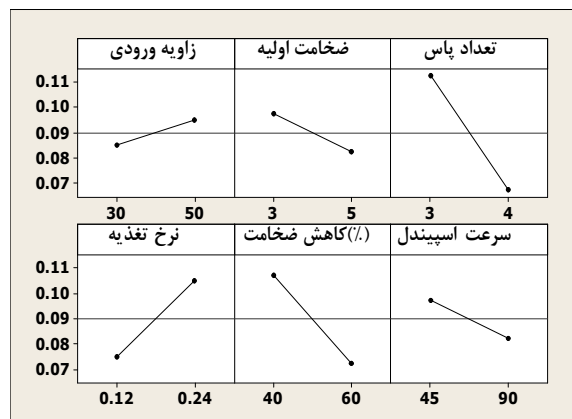
جدول ۴ نتایج خطای عدم گردی را در هر آزمایش نشان می‌دهد. پارامترهایی که بیشترین تأثیر را روی خطای گردی دارند مطابق شکل ۵، تعداد گذر(پاس)، درصد کاهش ضخامت و نرخ پیشروی می‌باشند.

جدول ۶- آنالیز واریانس و شرایط بهینه برای قطر داخلی

		آنالیز واریانس					شرایط بهینه			
عوامل	درجه آزادی	مجموع مربعات	واریانس	نسبت F	جمع خالص	درصد	مقدار سطح	سطح	سهم عامل	
۱	زاویه ورودی	۱	۰,۰۰۱	۰,۰۰۱	۱۵,۳۳۲	۰,۰۰۱	۵,۹۲۹	۳۰	۱	-۰,۰۰۹
۲	ضخامت اولیه	۱	۰,۰۰۳	۰,۰۰۳	۳۷,۳۲۹	۰,۰۰۳	۱۵,۰۲۹	۳	۱	-۰,۰۱۹
۳	تعداد گذر(پاس)	۱	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰	۰,۰۵۶	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰	۳	۱	-۰,۰۰۷
۴	نرخ تغذیه	۱	۰,۰۰۶	۰,۰۰۶	۶۴,۳۲۶	۰,۰۰۶	۲۶,۱۹۹	۰/۲۴	۲	-۰,۰۲۷
۵	کاهش ضخامت	۱	۰,۰۱۱	۰,۰۱۱	۱۱۴,۳۷۷	۰,۰۱۱	۴۶,۸۸۸	۳۰	۱	-۰,۰۳۷
۶	سرعت اسپیندل	۱	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰	۹,۳۳۱	۰,۰۰۰	۳,۴۴۶	۹۰	۲	-۰,۰۰۲
	سایر/خطا	۱	-۰,۰۰۱	-۰,۰۰۱			۲,۵۰۹			
	جمع	۷	۰,۰۲۴				۱۰۰,۰۰۰			-۰,۰۱۲



شکل ۶- تاثیر پارامترها روی زبری سطح (μm)



شکل ۵- تاثیر پارامترها روی خطای گردی (mm)

در نظر گرفته شده پارامترهای زیادی روی زبری تأثیر دارند، مانند نوع عملیات حرارتی و زمان آن، شعاع غلتک و مقدار روانساز. عملیات حرارتی انحلال بین گذرها (پاس‌ها) و پیر سختی بعد از فلوفرمینگ باعث بهبود صافی سطح می‌شود [۶] و افزایش مقدار روانساز زبری سطح را افزایش می‌دهد [۹]. علاوه بر آن با افزایش شعاع غلتک صافی سطح بهبود می‌یابد [۵]. همان‌طور که از شکل ۶ پیداست، بیشترین تأثیر روی زبری سطح مربوط به درصد کاهش ضخامت و ضخامت اولیه است. در صورتی که درصد کاهش ضخامت خیلی ناچیز باشد، عیوبی ایجاد شده که باعث کاهش کیفیت سطح و افزایش زبری می‌شود. این موضوع در قسمت عیوب بررسی شده است. در مورد درصد کاهش ضخامت‌های بالا، با افزایش آن و همچنین با افزایش ضخامت اولیه مقدار تغییر شکل زیاد شده و این باعث غیریکنواختی تغییر شکل و افزایش ناصافی سطح می‌شود. این اثر هنگامی که نرخ تغذیه نیز بالا باشد، تشدید می‌شود [۸].

با افزایش تعداد گذر (پاس) و درصد کاهش ضخامت، یکنواختی تغییر شکل افزایش می‌یابد و این باعث کاهش خطای گردی می‌شود. بر عکس هر چقدر نرخ پیشروی بیشتر باشد تغییر شکل غیریکنواخت‌تر می‌شود و مواد فرصت لازم برای شکل‌گیری همگن را نخواهند داشت، بنابراین خطای گردی افزایش می‌یابد. جدول ۷ نتایج تحلیل آنالیز واریانس را نشان می‌دهند. کمترین مقدار خطای عدم گردی در شرایط بهینه $0/011$ میلی‌متر می‌باشد.

۴-۴- زبری سطح

زبری سطح تأثیر زیادی در مقاومت به خوردگی و خستگی دارد. زبری داخلی در قطعات فلوفرمینگ اغلب بسیار نزدیک زبری مندرل می‌باشد. بنابراین در این کار تنها زبری سطح خارجی اندازه‌گیری شده است. طبق مستندات قبلی، علاوه بر پارامترهای

جدول ۷- آنالیز واریانس و شرایط بهینه برای خطای گردی

آنالیز واریانس							شرایط بهینه			
عوامل	درجه آزادی	مجموع مربعات	واریانس	نسبت F	جمع خالص	درصد	مقدار سطح	سطح	سهم عامل	
۱	زاویه ورودی	۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۹۹۹	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۳۰	۱	-۰/۰۰۶
۲	ضخامت اولیه	۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۲/۲۴۹	۰/۰۰۰	۲/۶۰۳	۵	۲	-۰/۰۰۸
۳	تعداد گذر(پاس)	۱	۰/۰۰۴	۰/۰۰۴	۲۰/۲۴۸	۰/۰۰۳	۴۰/۱۰۴	۴	۲	-۰/۰۲۳
۴	نرخ تغذیه	۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۸/۹۹۹	۰/۰۰۱	۱۶/۶۶۶	۰/۱۲	۱	-۰/۰۱۵
۵	کاهش ضخامت	۱	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲	۱۲/۲۴۹	۰/۰۰۲	۲۳/۴۳۷	۴۵	۲	-۰/۰۱۸
۶	سرعت اسپیندل	۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۲/۲۴۹	۰/۰۰۰	۲/۶۰۳	۹۰	۲	-۰/۰۰۸
	سایر/خطا	۱	-۰/۰۰۱	-۰/۰۰۱			۱۴/۵۸۷			
	جمع	۷	۰/۰۰۹				۱۰۰/۰۰۰			-۰/۰۷۸

جدول ۸- آنالیز واریانس و شرایط بهینه برای زبری سطح

آنالیز واریانس							شرایط بهینه			
عوامل	درجه آزادی	مجموع مربعات	واریانس	نسبت F	جمع خالص	درصد	مقدار سطح	سطح	سهم عامل	
۱	زاویه ورودی	۱	۰/۳۹	۰/۳۹	۴۸۸۰۰	۰/۰۳۸	۹/۴۴۸	۵۰	۲	-۰/۰۷۱
۲	ضخامت اولیه	۱	۰/۱۷۹	۰/۱۷۹	۲۲۴۰۹۳	۰/۱۷۹	۴۴/۰۹۹	۳	۱	-۰/۱۵۰
۳	تعداد گذر(پاس)	۱	۰/۰۱۴	۰/۰۱۴	۱۷/۹۹۱	۰/۰۱۳	۳/۳۵۸	۴	۲	-۰/۰۴۳
۴	نرخ تغذیه	۱	۰/۰۲۲	۰/۰۲۲	۲۷/۴۵۱	۰/۰۲۱	۵/۲۲۸	۰/۱۲	۱	-۰/۰۵۳
۵	کاهش ضخامت	۱	۰/۱۴۵	۰/۱۴۵	۱۸۱/۵۱۳	۰/۱۴۴	۳۵/۶۸۲	۳۰	۱	-۰/۱۳۶
۶	سرعت اسپیندل	۱	۰/۰۰۴	۰/۰۰۴	۵/۰۴۰	۰/۰۰۳	۰/۷۹۸	۴۵	۱	-۰/۰۲۳
	سایر/خطا	۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰			۱/۳۸۷			
	جمع	۷	۰/۴۰۶				۱۰۰/۰۰۰			-۰/۴۷۷

نتایج آنالیز واریانس در جدول ۹ نشان داده شده است و بیشترین سختی بدست آمده در شرایط بهینه 109.5HB می‌باشد.

۴-۶- ایجاد عیوب

پوسته شدن سطح و ترک خوردگی داخلی قطعات از عیوب ایجاد شده در فرآیند فلوفرمینگ می‌باشند. این عیوب در شرایط خاصی از پارامترهای تکنولوژیکی و متالورژیکی اتفاق می‌افتند. اندازه‌ی دانه‌های بزرگ و غیریکنواخت و وجود ناخالصی‌ها در ماده‌ی قطعه‌کار از عوامل متالورژیکی تشدید کننده‌ی این عیوب می‌باشند. در صورت وجود این عوامل، تغییر شکل‌های غیریکنواخت ایجاد می‌شود و تنش‌های پسماند حاصل از آن نیز غیریکنواخت خواهد بود [۵]. در کار حاضر، ایجاد این عیوب از نظر تکنولوژیکی بررسی شده‌اند. اگر عمق بار وارد شده در مرحله‌ی اول شکل‌دهی (پاس اول) کم باشد و نرخ تغذیه نیز پایین باشد، تغییر شکل تنها در لایه‌های بیرونی قطعه اتفاق افتاده، لایه‌های داخلی تغییر شکل اندکی می‌یابند و کرنش سختی بالایی در پوسته‌ی قطعه‌کار ایجاد می‌شود. علاوه بر آن شکل‌دهی غیریکنواخت و ایجاد کشش در لایه‌های داخلی از طرف لایه‌های خارجی تغییر شکل یافته، باعث جوانه‌زنی ترک‌های داخلی در مکان ناهمگونی‌ها در ماده (مثل ناخالصی‌ها و

نتایج آنالیز واریانس نیز که در جدول ۸ آمده است، همان موارد بالا را نشان می‌دهد. کمترین زبری سطح در مقادیر بهینه‌ی پارامترهای ورودی $Ra=1.201\mu m$ بدست می‌آید.

۴-۵- سختی

سخت شدن قطعه‌کار بعد از فلوفرمینگ ناشی از کارسختی انجام شده روی آن، اغلب مطلوب می‌باشد. اگر سختی بعد از عملیات بسیار بالا رود و نیاز به قطعه با چقرمگی بیشتر باشد می‌توان یک عملیات حرارتی بعدی روی قطعات انجام داد. در قطعات فلوفرم شده، سختی سطح بیشترین مقدار است و کمترین سختی در مرکز ضخامت قطعه اتفاق می‌افتد [۱]. بر اساس نتایج آزمایش‌ها، درصد کاهش ضخامت و نرخ پیشروی مطابق شکل ۷ بیشترین تأثیر را روی سختی دارند. با افزایش درصد کاهش ضخامت مقدار کار سختی ناشی از کرنش زیاد، افزایش می‌یابد و بنابراین سختی بالا می‌رود. با افزایش نرخ پیشروی، زمان لازم برای انجام تغییر شکل پلاستیک کافی نیست و تغییر شکل به صورت غیریکنواخت انجام می‌شود. بعلاوه همان‌طور که از نتایج قبلی پیداست با افزایش نرخ پیشروی، RE% زیاد می‌شود و بنابراین کرنش پلاستیک کاهش یافته، سختی کاهش می‌یابد. همچنین با کاهش نرخ پیشروی توزیع سختی در ضخامت همگن‌تر خواهد بود.

جدول ۹- آنالیز واریانس و شرایط بهینه برای سختی

آنالیز واریانس							شرایط بهینه			
عوامل	درجه آزادی	مجموع مربعات	واریانس	نسبت F	جمع خالص	درصد	مقدار سطح	سطح	سهام عامل	
۱	زاویه ورودی	۱	۱۸,۰۰۰	۱۸,۰۰۰	۹,۰۰۰	۱۶,۰۰۰	۳,۷۴۲	۵۰	۲	۱,۵۰۰
۲	ضخامت اولیه	۱	۴۰,۵۰۰	۴۰,۵۰۰	۲۰,۲۵۰	۳۸,۵۰۰	۹,۰۰۵	۵	۲	۲,۲۵۰
۳	تعداد گذر(پاس)	۱	۲,۰۰۰	۲,۰۰۰	۱,۰۰۰	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰	۴	۲	۰,۵۰۰
۴	نرخ تغذیه	۱	۱۱۲,۵۰۰	۱۱۲,۵۰۰	۵۶,۲۵۰	۱۱۰,۵۰۰	۲۵,۸۴۷	۰,۱۲	۱	۳,۷۵۰
۵	کاهش ضخامت	۱	۱۸۰,۵۰۰	۱۸۰,۵۰۰	۹۰,۲۵۰	۱۷۸,۵۰۰	۴۱,۷۵۴	۶۰	۲	۴,۷۵۰
۶	سرعت اسپیندل	۱	۷۲,۰۰۰	۷۲,۰۰۰	۳۶,۰۰۰	۷۰,۰۰۰	۱۶,۳۷۴	۹۰	۲	۳,۰۰۰
	سایر/خطا	۱	۲,۰۰۰	۲,۰۰۰			۳,۲۷۸			
	جمع	۷	۴۲۷,۵۰۰				۱۰۰,۰۰۰			۱۵,۷۵۰

۵- نتیجه گیری

مهمترین پارامترهای مؤثر بر فرآیند فلوفرمینگ مطالعه و اثر آن‌ها بر هر یک از عوامل اصلی تعیین کننده کیفیت قطعه‌کار، ارزیابی شد. مهمترین نتایج بدست آمده به شرح زیر است:

(۱) نرخ تغذیه یکی از مهمترین پارامترهای تعیین کننده کیفیت قطعه‌کار است. کاهش نرخ تغذیه باعث افزایش درصد کاهش ضخامت مؤثر، کاهش خطای گردی، کاهش زبری سطح، افزایش سختی و یکنواختی خواص می‌شود. البته مقادیر پایین نرخ پیشروی اگر با درصد کاهش ضخامت زیاد همراه شود، قطر داخلی را افزایش می‌دهد.

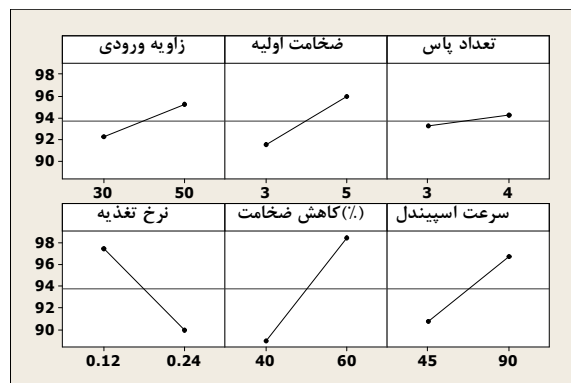
(۲) درصد کاهش ضخامت پارامتری دیگر است که تأثیر زیادی بر فلوفرمینگ و کیفیت قطعات حاصل می‌گذارد. هرچقدر درصد تغییر ضخامت بیشتر باشد، درصد کاهش ضخامت مؤثر بیشتر، رشد قطری، زبری سطح و سختی قطعه بیشتر می‌شود و خطای گردی کاهش می‌یابد.

(۳) با افزایش تعداد گذر(پاس) در عملیات فلوفرمینگ، درصد کاهش ضخامت مؤثر و سختی قطعه‌ی نهایی افزایش و میزان خطای گردی کاهش می‌یابد.

(۴) عیوبی مانند ترک داخلی و لبه‌ای و فلسی شدن تحت شرایط خاص متالورژیکی و تکنیکی ایجاد می‌شوند. با افزایش اندازه دانه‌ها و چگالی ناخالصی‌ها در ماده، عمق بار کم در گذر (پاس) اول و عمق بار زیاد در گذرهای (پاس‌های) بعدی، به همراه نرخ تغذیه ی پایین، احتمال رخداد این عیوب افزایش می‌یابد.

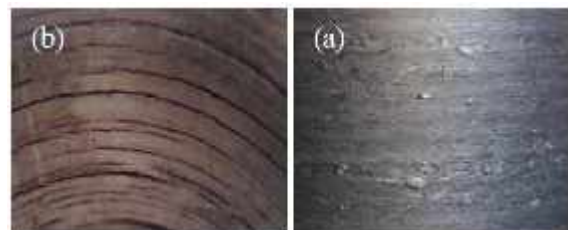
مراجع

[1] Roy, M.J., Klassen, R.J., Wood, J.T., "Evolution of plastic strain during a flow forming process", J. Mater. Process. Technol. 209, 1018-1025, 2009.
 [2] Lin, J. L., Wang, K. S., Yan, B. H., & Tarn, Y. S. "Optimization of electrical discharge machining



شکل ۷- تأثیر پارامترها روی سختی

مرزدانه‌های بزرگ) می‌شود. پس از آن با انجام گذرهای (پاس-های) بعدی، پوسته‌ی سخت شده، به‌خاطر غیر یکنواختی سختی در ضخامت، جدا شده و شکل آن به دلیل عوامل متالورژیکی گفته شده به صورت فلسی خواهد بود(شکل ۸a). به‌علاوه با ایجاد نیروی کششی حاصل از فلوفرمینگ مستقیم، ترک‌ها رشد کرده و به ترک‌های بزرگ محیطی، مانند شکل ۸b، تبدیل می‌شوند. این اثرات با افزایش عمق بار در گذرهای (پاس‌های) بعدی، کاهش نرخ پیشروی و افزایش تعداد گذرها (پاس‌های) افزایش می‌یابد [۸].



شکل ۸- عیوب (a- فلسی شدن. b- ترک داخلی).

- process based on the Taguchi method with fuzzy logics", J. Materials Processing Technolog, 102, 48–55, 2000.
- [3] Gopalsamy, B.M., Mondal, B., Ghosh,S., "Taguchi Method And ANOVA:An Approach For Process Parameters Optimazion Of Hard Machining While Machining Hardend Steel", J. Sci. & Ind. Vol. 68, Pp.686-695, 2009.
- [4] M. Gur, J. Tirosh, "Plastic flow instability under compressive loading during shear spinning process", Trans. of the ASME, J. Eng. Ind. 104 17–22, 1982
- [5] Rajan, K.M., Narasimhan, K., "An investigation of the development of defects during flow forming of high strength thin wall steel tubes", ASM J. Pract. Failure Anal. 1 (5), 69–76, 2001.
- [6] Fazeli, A.R., Ghoreishi, M.,2009. "Investigation Of Effective Parameters On Surface Roughness In Thermomechanical Tube Spinning Process", Int J Mater Form 2:261–270, 2009
- [7] Joseph Davidson, M., Balasubramanian, K., Tagore, G.R.N., "Experimental investigation on flow-forming of AA6061 alloy—a Taguchi approach", J. Mater. Process. Technol. 200, 283–287. 2008.
- [8] Joseph Davidson, M., Balasubramanian, K., Tagore, G.R.N., "An Experimental Study On The Quality Of Flow-Formed AA6061 Tubes", J. Mater. Process. Technol. 203,321-325. 2008.
- [9] Joseph Davidson, M., Balasubramanian, K., Tagore, G.R.N., "Surface Roughness Prediction Of Flow-Formed AA6061 Alloy By Design Of Experiments" ., J. Mater. Process. Technol. 202, 41-46. 2008.
- [10] Material information resource, "Aluminum 7075-O", Available from:
<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=da98aea5e9de44138a7d28782f60a836>, Internet.
- [11] Taguchi. G., Chowdhury. S., Wu., Y. "Taguchi's Quality Engineering Handbook", John Wiley and Sons, Inc., Canada, 2005.
- [12] Wong, C.C., Dean, T.A., Lin, J., "Incremental forming of solid cylindrical components using flow forming principles", J. Mater. Process. Technol. 153–154, 60–66. 2004.