



mme.modares.ac.ir

شبیه سازی و مطالعه تجربی ایجاد بید به سمت داخل لوله آلومینیومی به وسیله شکل دهی الكترومغناطيسي با استفاده از روش تاگوچي

مهدى ظهور 1^، بهمن قربانى2، محمد محمدى نيا3، عليرضا فلاحى آرزودار4

1- دانشيار، مهندسی مکانيک، دانشگاه صنعتی خواجه نصيرالدين طوسی، تهران 2- دانش أموخته كارشناسي ارشد، مهندسي مكانيك، دانشگاه صنعتي خواجه نصيرالدين طوسي، تهران 3- دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

4- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

* تهران، صندوق پستى 1999-1939s، mzohoor@kntu.ac.ir *

چکیدہ	اطلاعات مقاله
شکلدهی الکترومغناطیس یکی از روشهای شکلدهی پرسرعت است. در این روش شکلدهی، از نیروی الکترومغناطیسی لورنتس جهت شکلدهی قطعات استفاده میشود. اتصال قطعات با استفاده از این فرایند یک روش نوین برای مونتاژ قطعات با هدایت الکتریکی بالا میباشد. ارزیابی فرایند شکلدهی بید به سمت داخل به منظور اطمینان از کیفیت و استحکام اتصالات تولید شده با این روش بسیار مهم است. در این	مقاله پژوهشی کامل دریافت: 19 شهریور 1394 پذیرش: 06 آذر 1394 ارائه در سایت: 02 دی 1394
— نوشتار ابتدا فرایند به صورت شبیهسازی کوپل در نرمافزار آباکوس شبیهسازی شد. بدین منظور، ابتدا مشخصات هندسی، فیزیکی و مکانیکی لوله،	كليد واژگان:
سیمپیچ در قالب زیر برنامه داده شده تا فشار الکترومغناطیسی فعال بر لوله محاسبه شود. فشار الکترومغناطیسی به صورت یک نیروی مکانیکی	شكلدهي الكترومغناطيسي
در نرمافزار آباکوس بر روی لوله اعمال شده و شکل نهایی لوله بدست میآید. آزمایش تجربی برای صحتسنجی نتایج انجام شد. سپس اثر	شکلدھی سرعت بالا
پارامترهای مهم فرایند، مانند ولتاژ تخلیه، لقی بین قالب و لوله، طول و ضخامت دیواره لوله، بر روی عمق بید با استفاده از روش طراحی آزمایش	المان محدود
تاگوچی و تحلیل سیگنال به نویز بررسی شدند. در نهایت تطابق بسیار خوبی بین نتایج شبیهسازی و نتایج تجربی مشاهده گردید. عمق بید در شبیهسازی کوپل در مقایسه با نتایج تجربی، در حدود %4 خطا داشت.	طراحی آزمایش

Simulation and experimental study on inward aluminum tube bead formation by using electromagnetic forming with taguchi method

Mehdi Zohoor^{1*}, Bahman Ghorbani¹, Mohammad Mohammadi Nia², Ali Reza Fallahi Arezoodar²

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

2- Faculty of Mechanical Engineering, Amir Kabir University of Technology, Tehran, Iran

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

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper Received 10 September 2015 Accepted 27 November 2015 Available Online 23 December 2015

Keywords: Electromagnetic Forming High Speed Forming Finite Element Desig

مكانىڭ

ABSTRACT

Electromagnetic forming is a high energy rate forming process applied for manufacturing and assembly of many parts that are used in automobile and aerospace industries. In this process, the electromagnetic body forces (Lorentz forces) are used to produce metallic parts. Joining high electrical conductivity parts by using electromagnetic forming process is an innovative method. Therefore, it is very important to use a proper technique to ensure the quality of the Strength of Electromagnetic Joints. In this article, this process was simulated in ABAQUS. Then geometric, physical and mechanical specifications of the tube and coil are entered to subroutine and the magnetic pressure is obtained; by applying them on tube in ABAQUS software, agent analysis of the process and deformation of the work-piece is obtained. The wall

Design of Experience	effective process parameters thickness and length of the experiment technique based o found between simulation and compared to experimental rest	such as discharge voltage, clearanc tube on depth of bead were experir on Taguchi Method and signal to noise. d experimental results. The depth of be ult had about 4% error.	e between the tube and die, wall nentally investigated by design of Finally, very good agreement was ead in sequential coupled algorithm
قطعات را با تعداد عمليات كمتر توليد كرد. اين	شکلدهی، میتوان بسیاری از		1- مقدمه
ر به کاهش وزن قطعات و افزایش بازدهی	امر در نهایت میتواند منج	مانند شکلدهی انفجاری، یکی از	فرايند شكلدهي الكترومغناطيس
	محصولات صنعتی شود [1-3].	ست. این فرایند برای فلزاتی با قابلیت	فرایندهای شکلدهی با سرعت بالا ا
خازن و بسته شدن ناگهانی سوئیچ فشار قوی	مطابق شکل 1، با تخلیه	مینیم، مس، نقره، برنج و برخی فولاد-	هدایت الکتریکی بالا مانند آلیاژهای آلو
ا در سیمپیچ میشود. به این ترتیب در اطراف	باعث ایجاد جریان نوسانی میر	ممزمان این فرایند با روشهای متداول	ها بسیار مناسب است. با به کارگیری ه

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Zohoor, B. Ghorbani, M. Mohammadi Nia, A. R. Fallahi Arezoodar, Simulation and experimental study on inward aluminum tube bead formation by using electromagnetic forming with taguchi method, Modares Mechanical Engineering, Vol. 16, No. 1, pp. 129-132, 2016 (in Persian)



Fig. 1 Schematic of Electromagnetic Forming Circuit [4] شكل 1 شماتيك اجزاء شكل دهي الكترومغناطيسي [4]

سیم پیچ یک میدان مغناطیسی متغیر نسبت به زمان ایجاد می شود. طبق قانون لنز، ميدان مغناطيس پالسي شكل ايجاد شده جريان الكتريكي ثانويهاي در قطعه کار (لوله) القا کرده که جهت آن خلاف جهت سیم پیچ ابزار است. این جریان بوجود آمده یک میدان مغناطیسی دیگری تشکیل میدهد. دو میدان مغناطیسی موجود، نیروهایی بوجود میآورند که مخالف یکدیگر میباشند (نیروی الکترومغناطیسی لورنتس)؛ نیروی دافعه به میزانی است که منجر به تغيير شكل پلاستيک لوله مي شود [4-9].

این روش برای فرمدهی و اتصال فلزات با هدایت الکتریکی بالا میتواند استفاده شود (شکل 2). کاربرد این فرایند در کارخانجات فلزکاری شامل خودرو، هوافضا و غیره مخصوصا در قطعات مونتاژی است [6-8]. از مزیتهای فرايند شكل دهى الكترومغناطيس مىتوان به عدم وجود تماس فيزيكى بين سیم پیچ و قطعه کار، تماس یک طرف قالب با قطعه کار، برگشت فنری کم نسبت به فرایندهای استاتیکی مشابه، بهبود خواص مکانیکی قطعه کار و قابلیت شکل پذیری به دلیل نرخ کرنش بالا در فرایند اشاره کرد [2,1]. از محدوديتهاى روش شكل دهى الكترومغناطيس اين است كه قطعه كار بايد رسانای جریان الکتریکی باشد.

نخستین بار موراکشی¹ و همکارانش [3] در سال 1998 شکلدهی بید به سمت داخل یک لوله آلومینیومی را بررسی کردند. آنها در شبیهسازی که به وسیله نرمافزار مارک² انجام دادند، از یک روش استاتیکی برای اعمال فشار بر روی لوله استفاده کردند و فشار مغناطیسی به صورت مقداری ثابت در نظر گرفته شد.

كوريا³ و همكارانش [10] در سال 2008 فشار الكترومغناطيس را با فرض مستقل بودن دو قسمت الكترومغناطيس و سازهى اين فرايند و با حل عددى معادلات ماکسول برای هندسه ورق تخت، محاسبه کردند.

ابراهیمی و همکارانش [4] نیز در سال 2009 شکلدهی انبساطی لوله-ای از جنس آلومینیوم را به روش الکترومغناطیس با نرمافزار انسیس⁴ شبیه-سازی کردند؛ و سپس فلاحی آرزودار و همکارانش [6] در سال 2012 تحلیل گذرای کوپل الکترومغناطیس و تحلیل سازهای فرایند شکلدهی





کاشانی و همکارانش [2] در سال 2015 شبیهسازی کوپل فرایند شکلدهی الکترومغناطیس توسط نرمافزار انسیس و نرمافزار داینا⁰را انجام دادند. آنها تحليل كوپل الكتريك و مغناطيس را توسط نرمافزار انسيس شبيهسازي كردند و نتايج نيرويي آن را استخراج و با اعمال اين نيروها به لوله، تحليل سازهای را در نرمافزار داینا انجام دادند. این تعامل بین دو نرمافزار چندین مرتبه ادامه پیدا کرده تا کل زمان فرایند به اتمام رسیده و شکل نهایی لوله بدست آيد.

تاکنون نرمافزار مجزایی که هر دو قسمت الکترومغناطیس و سازهای فرایند را همزمان و به صورت کوپل شبیهسازی کند، ارائه نشده است. نرمافزار انسيس تنها قابليت كوپل قسمت الكتريكي و مغناطيسي فرايند را دارا بوده و نيروهاي الكترومغناطيسي را ميتواند محاسبه كند. اما نرمافزار آباكوس توانایی تحلیل شکل دهی سرعت بالا و تخصیص خواص مادهٔ وابسته به نرخ کرنش را دارد.

لذا در این نوشتار از نرم افزار المان محدود آباکوس برای شبیهسازی فرايند استفاده مى شود. بدين صورت كه، محاسبات الكترومغناطيسى در قالب زيربرنامه أانجام شده و فشار الكترومغناطيسي اعمالي به لوله را محاسبه مى كند. فشارالكترومغناطيسي فعال بر روى لوله در هر لحظه زماني و در نرم-افزار آباکوس اعمال شده و تغییر شکل لوله را سبب می شود. سپس محاسبات الكترومغناطیسی جدیدی بعد از بروز رسانی هندسه لوله انجام میشود. در هر گام زمانی این محاسبات انجام میشود. این تعامل چندین مرتبه ادامه پیدا کرده تا کل زمان فرایند به اتمام رسیده و شکل نهایی لوله بدست آید. سپس جهت اعتبار سنجى روش مورد استفاده، شكلدهى بيد به سمت داخل لوله آلومینیوم 1100 با استفاده از سیمپیچ فشاری، به صورت تجربی بررسی شد. برخی پارامترهای مهم فرایند مانند ولتاژ تخلیه، لقی بین قالب و لوله، طول و ضخامت دیواره لوله، بر روی عمق بید با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی، مطالعه شده است. بدین منظور عامل عمق فرو رفتگی به عنوان متغیر خروجی در نظر گرفته شده و عوامل (ولتاژ تخلیه، لقی بین قالب و لوله، طول و ضخامت دیواره لوله) به عنوان متغیرهای ورودی در نظر گرفته شده-اند. پس از طراحی آزمایشها، آزمونهای تجربی مطابق این طراحی انجام

انقباضی لولهای از جنس آلومینیوم را به روش شکلدهی الکترومغناطیس را به صورت عددی و شبیهسازی انجام دادند. آنها تحلیل کوپل الکتریک و مغناطیس را توسط نرمافزار انسیس شبیهسازی کردند و نتایج نیرویی آن را استخراج و با اعمال این نیروها به لوله، تحلیل سازهای را در نرمافزار آباکوس ' انجام دادند.

6- LS-DYNA	1- Murakoshi
7- Subroutine	2- MARC
8- Analysis of Variance (ANOVA)	3- Correia
9- Loose-coupled	4- ANSYS
10- Sequential-coupled	5- ABAQUS

مهندسی مکانیک مدرس، فروردین 1395، دورہ 16، شمارہ 1

دهی الکترومغناطیسی استفاده می شود [11-18]. در روش کوپل ضعیف میدان الکترومغناطیس، معادلات حاکم بر الکترومغناطیس مسأله و معادلات حاکم بر قسمت سازهای مسأله مستقل از هم حل می شوند. اما در الگوریتم کوپل ترتیبی، شبیه سازی الکترومغناطیسی و شبیه سازی سازه ای به طور متناوب انجام می شود و تغییر هندسه قطعه کار تابع زمان در حل معادلات حاکم بر قسمت الکترومغناطیس مسأله لحاظ می شود.

کوپل ترتیبی مورد استفاده در این تحقیق بدین صورت است که، ولتاژ و مشخصات هندسی، فیزیکی و مکانیکی لوله، سیمپیچ و قالب (جدول 1) و همچنین کد معادلات الکترومغناطیس به زبان فورترن نوشته شد. سپس در قالب زیربرنامه قرار گرفت تا محاسبات الکترومغناطیسی را انجام داده و فشار الکترومغناطیسی اعمالی به لوله را محاسبه کند. فشار الکترومغناطیس بدست آمده از زیر برنامه، در نرم افزار آباکوس بصورت فشار مکانیکی بر روی تک تک گرههای مدل لوله اعمال میشود (شکل 3). سپس محاسبات الکترومغناطیسی جدیدی بعد از بروز رسانی هندسه لوله انجام میشود. در هر گام زمانی این محاسبات انجام میشود تا کل زمان فرایند به اتمام رسیده و شکل نهایی لوله بدست آید. کل زمان فرایند شکلدهی الکترومغناطیس مورد شرسی 3μ3، به طول میانجامد و گام زمانی جهت پایدار بودن فرایند شبیهسازی 5μ3، به طول میانجامد و گام زمانی جهت پایدار بودن فرایند

با توجه به ماهیت فیزیکی پیچیده این فرایند، برخی از سادهسازیها و فرضیات به شرح ذیل صورت گرفته است:

1- در طول فرایند شکلدهی الکترومغناطیس، تغییر شکل با سرعت بالا

جدول 1 مشخصههای مواد استفاده شده در فرایند شبیهسازی

Table 1 used material parameters in simulation							
	مقدار	قطعات					
	1	نفوذپذیری مغناطیسی (µ)	سيم پيچ (مس)				
	1.72e-8	مقاومت الكتريكي (mΩ)					
	13	تعداد دور					
	1	نفوذپذیری مغناطیسی (µ)	لوله (آلومينيوم 1100)				
	5e-8	مقاومت الكتريكي (mΩ)					
	2700	چگالی (kgm-3)					
	148.361	استحكام تسليم (MPa)					
	345.513	استحکام نهایی (MPa)					
	65.762	مدول الاستيسيته (GPa)					
	0.3	ضريب پواسون					



و در عرض چند میکرو ثانیه انجام می شود. در این حالت، میدان الکترومغناطیس ممکن است به دلیل تغییرات ضریب خودالقائی متقابل بین سیم پیچ و لوله، تغییر کند. لذا اثر متقابل بین جابجایی لوله و چگالی میدان مغناطیسی قابل اغماض می باشد و فرض شده که سرعت دیواره لوله بر روی میدان مغناطیسی تاثیر ندارد.

2- لوله غیر مغناطیس بوده و هدایت الکتریکی و نفوذپذیری آن ثابت فرض شده است.

3- خواص مواد (هدایت الکتریکی و هدایت مغناطیسی) ایزوتروپیک هستند و با افزایش دما و زمان ثابت فرض شدهاند و تاثیرات حرارت در نظر گرفته نشده است. و همچنین مطابق مرجع [19] از افزایش حرارت به دلیل جریان القایی صرفنظر شده است.

برای انجام شبیه سازی از نرمافزار اجزای محدود آباکوس استفاده شده است. مدل هندسی شامل یک قالب و لوله میباشد. بدلیل تقارن محوری لوله و قالب، شبیه سازی در حالت دو بعدی انجام گرفت (شکل 5). لوله به صورت مادهی شکل پذیر همگن و همسانگرد و با المان سیمی تقارن محوری (SAX1) و همچنین قالب به صورت صلب تحلیلی مدل شده و تمام درجات آزادی قالب بسته (صلب) شده است. برای مدل کردن اصطکاک بین قالب و لوله از مدل کلمب استفاده و مقدار ضریب اصطکاک 10 فرض شده است.

با توجه به اینکه فرایند شکلدهی الکترومغناطیس منجر به ایجاد نرخ کرنش بین ¹02 و ¹04 می گردد. معادلههای مشخصه زیادی همانند کوپر -سایموند¹ یا جانسون - کوک² به منظور در نظر گرفتن اثر دینامیکی در رفتار





Fig. 4 used algorithm for simulation of electromagnetic forming process

شکل 4 الگوریتم استفاده شده برای شبیه سازی فرایند شکلدهی الکترومغناطیس

Cowper-Symonds
 Johnson-Cook

131

Fig. 3 2D finite element model with node number on tube

شکل 3 مدل 2 بعدی المان محدود به همراه شماره گرهها بر روی لوله

مهندسی مکانیک مدرس، فروردین 1395، دورہ 16، شمارہ 1



Fig. 5 Axi-Symmetry Schematic of workpiece, coil and die in inside bead forming

شکل 5 شماتیک قطعه کار، سیمپیچ و قالب به صورت تقارن محوری در فرایند بید به سمت داخل

مواد پیشنهاد شدهاند. مدل ماده دراین شبیه سازی به علت بالابودن سرعت شکلدهی، معادله ویسکوپلاستیک جانسون-کوک در نظر گرفته شد. این معادله به شکل (1) می باشد [20]:

$$\bar{\sigma} = \left[A + B\bar{\varepsilon}^n\right] \left[1 + C\ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right] \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r}\right)^m\right] \tag{1}$$

c در این معادله $\overline{\sigma}$ تنش جریان، A تنش جاری شدن، n توان کرنش سختی، cضریب حساسیت به نرخ کرنش، \overline{c} نرخ کرنش پلاستیک لحظهای و \overline{c}_0 نرخ کرنش پلاستیک مرجع، T دمای قطعه کار، T_m دمای ذوب ماده، T_r دمای تبدیل (معمولا دمای محیط)، m ضریب ماده که نرم شدن ماده در دماهای بالا میباشد. برای بهدستآوردن ضرایب معادلهی جانسون-کوک نیاز به آزمایش هاپکینسون با نرخ کرنش بالا و دماهای مختلف میباشد. لذا به دلیل عدم امكان انجام عملي اين آزمايش، در اين پژوهش از آلومينيوم 1100 با خواص مطابق جدول 2 و طبق مرجع [11] استفاده شد.

3- کارهای تجربی

در عمليات شكل دهي، لوله تحت فشار الكترومغناطيس، به داخل قالب كشيده شده و به شکل مورد نظر خواهد رسید. اجزاء سیستم شکل دهی که شامل بانک خازن، سویچ اسپارک گپ، قالب، سیمپیچ و قطعه کار میباشد، در شکل 6 آورده شده است.

همچنین پارامترهای الکتریکی و مغناطیسی مدار معادل در جدول 3 نشان داده شده است.

با استفاده از یک آرایه متعامد، بررسی پارامترها انجام شد.

سطوح پارامترهای مورد آزمایش، شامل ولتاژ تخلیه، لقی بین قالب و لوله، طول و ضخامت دیواره لوله در جدول 4 نشان داده شده است. معیار ارزباب فرابند (متغبر باسخ) عمق فرو روى مر باشد

Fig. 6 Electromagnetic Forming Equipment شكل 6 تجهيزات شكلدهي الكترومغناطيس

جدول 3 پارامترهای الکتریکی و مغناطیسی مدار معادل Table 3 Electrical and magnetic parameters of equivalent circuit

ظرفیت بانک خازن	اندوكتانس معادل	مقاومت الكتريكي
(ميكرو فاراد)	(ميكرو هانري)	(میلی اهم)
253	3.6	30

جدول 4 پارامترهای مورد بررسی به همراه سطوح آنها

able 4 investigating parameters with their levels						
سطح 3	سطح 2	سطح 1	پارامتر			
0.7	0.6	0.5	ضخامت دیواره لوله (mm)	Α		
0.15	0.10	0.04	لقى بين لوله و قالب (mm)	В		
50	40	30	طول لوله (mm)	С		
5	4.5	4	ولتاژ تخليه (kV)	D		

میلیمتر می باشد، به نحوی آماده شدند که لقی های 0.04 و 0.10 و 0.15 بین قطر داخلي لوله و قطر خارجي قالب بوجود آيد. (قطر داخلي لولهها 47.08 و 47.20 و 47.30 میلیمتر تراشکاری گردید) سپس نمونهها با استفاده از تجهیزات موجود در شکل 5 مورد تست قرار گرفت و سپس میزان عمق بید با استفاده از دستگاه CMM اندازه گیری شد. لازم به توضیح است که در بعضی از آزمایشها نمونه از چند ناحیه دچار پارگی و یا چروک گردید که در این موارد، میزان عمق فرو روی در نواحی سالم مورد سنجش قرار گرفت.

سپس از آنالیز واریانس برای ارزیابی تاثیر فاکتورها بر روی خروجی (عمق بید) استفاده شده است. و همچنین به منظور تعیین بهترین مقدار پارامترهای ورودی در محاسبات آماری از نسبت سیگنال به نویز (S/N) استفاده می شود. در روش تاگوچی، سیگنال مقدار مطلوب (میانگین) و نویز مقدار نامطلوب (انحراف استاندارد) بر روی مشخصه کیفی را نشان میدهد و شود. در این تحقیق این نسبت از نوع بزرگتر-ان زست ارد دو حاصا

ار نسبت این دو خاصل میشود. در این تحقیق این نسبت از نوع بزرک			.0	روی میب	نع) عمق فرو ر	يىك رمىغىر پە	ارریابی قرا
بهتر 1 میباشد، که این حالت مطابق رابطه (2) میباشد.	راحي	L ^g برای ط	متعامد 9	ی با آرایه	زمایش تاگوچ	ش طراحی آز	از رو،
$\binom{S}{n} = -\log \frac{1}{2} \left(\sum_{n=1}^{n} \frac{1}{2} \right) \tag{1}$	طرح	مکن برای	آزمایش م	، اساس، 9	ىت كە بر اين	ىتفادە شدە اس	آزمایش اس
$\binom{N}{n} = \log_n \left(\sum_{i=1}^{n} y_i^2 \right) \tag{1}$					د داشت [21].	ی وجود خواهد	مورد بررس
· · · · · ·	یکی	A که دارای	ىي L1100	ایی از جنہ	آزمایش، لولهھ	نه به طراحی ا	با توج
4- تایج و بحت جدول 5 نتایج مربوط به شبیهسازی و آزمون تجربی را در 9 حالت طراح	50	30 و 40 و (ِ طولھای	تر و یکی از) و 0.7 میلیم	های 0.5 و 0.6	از ضخامت
آزمایش تاگوچی نشان میدهد.			ہ [11]	مورد استفاد	کوک برای مادهٔ	سرايب جانسون-	جدول 2 خ
شكل 7 تغييبات ضخامت امله بالدير اثر اعمال نيرمهاي حاصل از ماتا	Tab	le 2 Johns	on-Cook	coefficie	ents for usin	g material [11]
مسلل ۲ میپیراف طاعات کوند ۲۱ کار ۲۰ محصل فیروسای مخلص از وصار	Ė ₀	п	т	С	<i>B</i> (MPa)	A (MPa)	جنس
The Larger The Better	1	0.183	0.859	0.001	345.513	148.361	AI 1100
-							

مهندسی مکانیک مدرس، فروردین 1395، دورہ 16، شمارہ 1

را در 9 حالت طراحی

1- The Larger The Better

مهدی ظہور و همکاران

Table :	Table 5 obtained results for tests in experimental and simulation								
	میزان خطا (%)	عمق فروروی نوک بید (mm)		ولتاژ تخليه	طول لوله	لقی بین لوله و قالب	ضخامت ديواره لوله	شماره	
_		تست تجربى	شبيەسازى	(kV)	(mm)	(mm)	(mm)	آزمايش	
	7.3	3	3.219	4	30	0.04	0.5	1	
	3.41	3.4	3.516	4.5	40	0.10	0.5	2	
	17.3	3.6	4.223	5	50	0.15	0.5	3	
	3.69	3.25	3.37	5	40	0.04	0.6	4	
	2.29	2.7	2.762	4	50	0.10	0.6	5	
	3.03	3.3	3.40	4.5	30	0.15	0.6	6	
	1.61	2.85	2.896	4.5	50	0.04	0.7	7	
	1.35	3.4	3.446	5	30	0.10	0.7	8	
	2.26	2.6	2.659	4	40	0.15	0.7	9	

جدول 5 نتایج جابجایی بدست آمده برای آزمایشهای انجام شده در دو حالت تجربی و شبیهسازی



Fig. 7 thickness variations in tube length at the end of forming process

شکل 7 تغییرات ضخامت در راستای طول لوله در پایان زمان شکلدهی

تخلیه 4000۷ برای لوله با طول 40mm و با ضخامت mm 0.7 را در انتهای فرایند شکلدهی نشان میدهد. همان طور که مشخص است، بیشترین نازک شدگی در ناحیه تماس لوله با شعاع قالب به دلیل تنشهای کششی رخ می-دهد. همچنین بیشترین افزایش ضخامت در ناحیه فرو رونده در شیار قالب به دلیل وجود تنشهای فشاری در حین فرایند شکلدهی میباشد. همچنین موافق مراجع [6,4] مشاهده شده است که، در نوک بید نودهای ابتدایی افزایش ضخامت و در چند میکروثانیه انتهایی، نوک بید تحت کشش قرار می گیرد که منجر به کاهش جزئی ضخامت به صورت نسبی میشود.

همان طور که در جدول 5 مشاهده می شود، عمق بید فروروی درون شیار قالب در حالت شبیه سازی بیشتر از آزمون تجربی می باشد. دلیل این اختلاف این است که با تغییر مکان یا تغییر هندسه لوله، اندو کتانس لوله تغییر می کند و جریان گذرنده از لوله و نیروی اعمالی نیز تغییر می یابد. نتایج

در آن بوجود آمده است.

قطعه شماره 3 دارای چروکیدگی فراوان و پارگی شدید در 3 ناحیه می-باشد و ضخامت جداره لوله در مجاورت شعاع لبه قالب به شدت کاهش پیدا کرده است. دلیل پارگی ایجاد شده در این قطعه، ولتاژ تخلیه بالا و ضخامت پایین جداره لوله، و همچنین دلیل چروکیدگی ایجاد شده لقی زیاد بین قالب و لوله است.

قطعه شماره 4 بدون چروکیدگی و پارگی شکل داده شده است. در این تست لقی بین قالب و لوله کم بوده و ولتاژ تخلیه شده بیشتر میباشد ولی ضخامت جداره لوله نیز در مقایسه با قطعههای تست شماره 1 و 3 بیشتر میباشد و این باعث شده که قطعه دچار چروکیدگی خیلی کمی شده و پاره نشود.

قطعه شماره 5 دارای چروکیدگی کمی شده اما دچار پارگی نشده است. هر چند ولتاژ تخلیه شده مانند تست شماره 1 بالا میباشد ولی در این قطعه به دلیل ضخامت و طول بیشتر و لقی بیشتر در مقایسه با با قطعه تست 1، پارگی رخ نداده و قطعه کمی چروکیده شده است.

قطعه شماره 6 دارای چروکیدگی شده اما دچار پارگی نشده است. در این تست، قطعه به دلیل لقی زیاد بین قالب و لوله دچار چروکیدگی شده است در صورتی که به دلیل ضخامت بالاتر، ولتاژ تخلیه و طول کمتر در مقایسه با قطعه شماره 3، قطعه دچار پارگی نشده است.

قطعه شماره 7 دارای چروکیدگی شده و پارگی خفیفی در 2 ناحیه رخ داده بعلاوه ضخامت جداره لوله در مجاورت شعاع لبه قالب کمی کاهش پیدا کرده است. دلیل پارگی ایجاد شده در این قطعه، لقی بسیار کم بین قالب و لوله است که از جریان فلز جلوگیری میکند و منجر به پارگی لوله می شود.



Test No. 1: severer rupture in 2 zones and numerous wrinkles



Test No. 2: without rupture and a few wrinkles

آزمونهای تجربی در شکل 8 آورده شده است. قطعه شماره 1 دارای چروکیدگی فراوان و پارگی شدید در 2 ناحیه می-باشد و ضخامت جداره لوله در مجاورت شعاع لبه قالب به شدت کاهش پیدا کرده است. دلیل پارگی و چروکیدگی ایجاد شده در این قطعه، ضخامت یایین جداره لوله، طول کوتاه لوله و لقی بسیار کم بین قالب و لوله است که از جریان فلز جلوگیری می کند و منجر به پارگی لوله می شود. قطعه شماره 2 دارای کمی چروکیدگی بوده اما دچار پارگی نشده است. در این تست به دلیل لقی مناسب بین قالب و لوله و طول بیشتر لوله در مقایسه با قطعه تست شماره 1، قطعه دچار پارگی نشده و چروکیدگی کمی

مهندسی مکانیک مدرس، فروردین 1395، دورہ 16، شمارہ 1



Test No. 3: severer rupture in 3 zones and numerous wrinkles



Test No. 4: without rupture and wrinkles



Test No. 5: without rupture and a few wrinkles



Test No. 6: without rupture and medial wrinkles











Test No. 8: without rupture and few wrinkles



تست، ضخامت بالاتر و طول كوتاهتر قطعه و ولتاژ تخليه كمتر در مقايسه با قطعه شماره 3، دلیل پاره نشدن و عدم چروکیدگی قطعه می باشد.

در ادامه، آنالیز واریانس با فرض خطای نوع اول به اندازه **۵.05 =** ۵ انجام شده و درصد سهم هر فاکتور بر روی عمق فروروی تعیین می گردد که نتایج آن در جدول 6 نشان داده شده است.

نتايج آناليز واريانس نشان مي دهد كه سهم اثر عامل ولتاژ تخليه 72.34% میباشد که بیشترین تاثیر را روی عمق فرو روی بید دارد و پس از آن ضخامت لوله، طول لوله و لقى بين لوله و قالب به ترتيب بيشترين تاثير بر روی عمق فرو روی دارند.

به منظور تعیین بهترین مقدار پارامترهای ورودی در محاسبات آماری از نسبت سیگنال به نویز (S/N) استفاده می شود. (شکل 9) در این تحقیق این نسبت از نوع بزرگتر-بهتر میباشد.

با افزایش طول لوله، سطح تماس بین لوله و قالب، و به عبارت دیگر نيروى اصطكاك افزايش مىيابد. همچنين با افزايش طول لوله، انرژى الکتریکی بر روی سطح بیشتری تخلیه شده که منجر به کاهش فشار مغناطیسی اعمالی بر روی لوله می گردد.

افزایش ضخامت دیواره لوله باعث کاهش عمق فروروی شده و احتمال چروکیدگی و پارگی لوله را کاهش میدهد.

فاصله بین سیمپیچ و لوله نقش مهمی در توزیع میدان مغناطیسی بازی می کند. وقتی که فاصله بین لوله و سیم پیچ افزایش می یابد، ضریب خودالقایی متقابل در اجزاء مدار تغییر میکند. فاصله کوچکتر (افزایش لقی بین قالب و لوله) باعث ضریب خودالقایی پایین تر و نفوذ نیروی مغناطیسی بهتر می شود و باعث می گردد که فشار مغناطیسی بین لوله و سیم پیچ بیشتر شده و در نتیجه افزایش جابهجایی شعاعی می گردد. اما لقی بین لوله و قالب برخورد دوگانهای در برابر چروکیدگی و پارگی دارد به صورتیکه لقی کم از جریان فلز جلوگیری میکند و لوله پاره میشود و لقی زیاد باعث ایجاد چروکیدگی در لوله می شود. بدین صورت برای رسیدن به بهترین نتیجه باید لقی بین قالب و لوله به مقدار بهینهای برسد که نه از جریان فلز جلوگیری کرده و سبب پاره شدن آن شود و نه باعث چروکیدگی لوله شود.

فشار محاسبه شده توسط زير برنامه بر روى تمام المانها يكسان نيست. با توجه به میدان مغناطیسی محوری ایجاد شده در اطرف لوله که موازی با محور لوله میباشد، مرکز میدان در وسط لوله (از نظر طولی) میباشد، لذا فشار اعمالی در وسط لوله بیشتر بوده و هر چه به سمت لبههای آن می رویم فشار كاهش مي يابد. بيشينه فشار الكترومغناطيسي در ناحيه فرو رفتگي اتفاق میافتد و همچنین با افزایش میزان ولتاژ تخلیه، بیشینه فشار افزایش مییابد که موافق با مرجع [9] میباشد. افزایش ولتاژ تخلیه عمق فروروی در لوله را افزایش میدهد ولی باید توجه داشت که با توجه به پارامترهای دیگر از جمله ضخامت جداره لوله، افزایش ولتاژ تخلیه می تواند باعث پارگی لوله شود.

Test No. 9: without rupture and wrinkles

Fig. 8 formed tubes in tests

شکل 8 لولههای شکل داده شده در آزمایشها

قطعه شماره 8 دارای چروکیدگی خیلی کمی شده اما دچار پارگی نشده است. در این تست، ضخامت بالاتر و طول کوتاهتر قطعه در مقایسه با قطعه شماره 3، دلیل پاره نشدن قطعه میباشد و لقی مناسب از ایجاد چروکیدگی زیاد در این قطعه جلوگیری میکند. قطعه شماره 9 بدون یارگی و چروکیدگی شکل داده شده است. در این

Table 6 ANOVA for investigating parameters on bead depth
 عدد فيشر واريانس مجموع درجه سهم هر پارامتر (F) (V) مربعات آزادى عامل (%) (s) (f) A ضخامت لوله 14.283 10850.3 0.21 0.241 2 3799.5 0.084 2 5 0.042 لقى B8.359 6350.3 0.07 0.141 2 طول لوله C72.344 54950.2 0.61 1.221 2 ولتاژ تخليه D9 0.014 --0.001 -0.001 خطا

جدول 6 جدول ANOVA پارامترهای مورد بررسی بر روی عمق فروروی

مهندسی مکانیک مدرس، فروردین 1395، دورہ 16، شمارہ 1



شکل 10 دقت نتایج پیش بینی شده به وسیله مدل بدست آمده

آورده شده است.

5- نتیجه گیری

در این تحقیق ابتدا شبیه سازی کوپل فرایند شکل دهی بید به سمت داخل با استفاده از شکل دهی الکترومغناطیس توسط نرمافزار آباکوس انجام شد. در شبیه سازی این فرایند شکل دهی، تعریف خواص ماده بر اساس مدل وابسته به نرخ کرنش جانسون -کوک صورت گرفت. در ادامه برای صحه گذاری این شیوه شبیه سازی، نتایج نهایی با نتایج آزمون های تجربی مقایسه گردید و مشاهده شد که نتایج حاصل از شبیه سازی، با خطایی به میزان کمتر از %4 جابه جایی بیشتری را نسبت به آزمون تجربی نشان می دهد.

- با افزایش ولتاژ تخلیه، چگالی میدان مغناطیسی و فشار مغناطیسی افزایش مییابد که منجر به افزایش عمق فروروی می گردد.

- با کاهش لقی بین ورق و سیمپیچ، نفوذ میدان مغناطیسی بهتر شده و باعث می شود که فشار مغناطیسی بین لوله و سیمپیچ افزایش یابد. لقی بین لوله و قالب برخورد دوگانهای در برابر چروکیدگی و پارگی دارد به صورتی که لقی کم از جریان فلز جلوگیری می کند و لوله پاره می شود و لقی زیاد باعث ایجاد چروکیدگی در لوله می شود. بدین صورت برای رسیدن به بهترین نتیجه باید لقی بین قالب و لوله به مقدار بهینه ای برسد که نه از جریان فلز جلوگیری کرده و سبب پاره شدن آن شود و نه باعث چروکیدگی لوله شود.

- با افزایش طول لوله، سطح تماس بین لوله و قالب، و نیروی اصطکاک افزایش مییابد. همچنین با افزایش طول لوله، انرژی الکتریکی بر روی سطح بیشتری تخلیه شده که منجر به کاهش فشار مغناطیسی اعمالی بر روی لوله می گردد.

در نهایت پیشنهاد می شود برای تحقیقات آتی، طراحی آزمایشی انجام شود که هر سه پارامتر، عمق فرو روی، پارگی و چروکیدگی و تاثیر متقابل





نیروهای موجود در هنگام شکلدهی را می توان به دو دسته، نیروی شکل دهی و نیروی اصطکاک بین لوله آلومینیومی و قالب تقسیم کرد. نیروی اصطکاک وابسته به فشار مغناطیسی، ضریب اصطکاک و سطح تماس لوله و قالب بوده و نیروی شکل دهی وابسته به فشار مغناطیسی و عرض شیار، می باشد.

معادله رگرسیون برای آزمایش طراحی شده به صورت رابطه (3) بدست میآید، که معادله خطی عمق فروروی نوک بید را بر اساس پارامترهای مورد بررسی نشان میدهد. (3) Bead Depth = 1.59 – 1.92*A* + 1.25*B* – 0.00917*C* + 0.65*D* این رابطه نشان میدهد که ولتاژ تخلیه و لقی بین لوله و قالب ارتباط مستقیم و ضخامت و طول لوله ارتباط معکوس بر روی عمق فرو روی دارد. همچنین مقدار ضریب تعیین برای مدل (R²) برابر 0.961 به دست آمده است که این بدان معناست، مدل به دست آمده توانایی تخمین 1.60% تغییرات پاسخ سیستم را دارد که نشان از نیکویی برازش در مدل به دست آمده دارد.

آنها بر روی هم را در نظر گرفته و همچنین بهینه سازی فرایند با استفاده از روشهای بهینهسازی از قبیل الگوریتم ژنتیک انجام شود.

6- تقدیر و تشکر نویسندگان مقاله بر خود لازم میدانند از همکاری و کمک آقایان دکتر حسین ابراهیمی هراتمه و دکتر کوریا که انجام این پژوهش بدون کمک آنها امکانپذیر نبود، کمال تشکر و قدردانی را نمایند.

مهندسی مکانیک مدرس، فروردین 1395، دورہ 16، شمارہ 1

- [11] W. Xu, H. Fang, W. Xu, Analysis of the variation regularity of the parameters of the discharge circuit with the distance between work piece and inductor for electromagnetic forming processes, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 203, No. 1, pp.216–220, 2008.
- [12] N. K. Gupta, M. A. Iqbal, G. S. Sekhon, Experimental and numerical studies on the behavior of thin aluminum plates subjected to impact by blunt and hemispherical-nosed projectiles, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 32, No. 12, pp.1921–1944, 2006.
- [13] D. Luca, R. Diaconescu, On the possibility of agile manufacturing of religious objects by electromagnetic forming method, *European Journal* of Science and Theology, Vol. 9, No. 3, pp. 197-205, 2013.
- [14] M. A. Siddiqui, *Numerical modeling and simulation of electromagnetic forming process*, PhD thesis, Strasbourg University, 2009.
- [15] G. Bartels, W. Schätzing, H. P. Scheibe, M. Leone, Comparison of two different simulation algorithms for the electromagnetic tube compression, *International Journal of Material Forming*, Vol. 2, No. 1, pp. 693–696, 2009.
- [16] I. Pérez, I. Aranguren, B. González, I. Eguia, Electromagnetic forming: a new coupling method, *International Journal of Material Forming*, Vol. 2, No. 1, pp. 637–640, 2009.
- [17] Y. U. Haiping, L. I. Chunfeng, D. E. N. G. Jianghua, Sequential coupling simulation for electromagnetic–mechanical tube compression by finite element analysis, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 2, pp. 707–713, 2009.
- [18] G. Bartels, W. Schätzing, H. P. Scheibe, M. Leone, Models for electromagnetic metal forming, 3rd International Conference on High Speed Forming, pp. 121-128, 2008.
- [19] J. Jablonski, R. Wrinkler, Analysis of the electromagnetic forming process, *International Journal of mechanical sciences*, Vol. 20, No. 5, pp. 315–25, 1978.
- [20] G. R. Johnson, W. H. Cook, A constitutive model and data for metal subjected to large strains, high strain rates and high temperatures, *The Netherlands Proceeding seventh International Symposium on ballistic*, pp. 541-547, 1983.
- [21] R. K. Roy, *A primer on the Taguchi method*, 2nd *edition*, Society of Manufacturing Engineering, pp. 50-150, Michigan, 1990.

- [1] M. Zohoor, B. Ghorbani, Analytical and numerical investigation of significant parameters on strength of electromagnetically assembled aluminum tube joints, *Journal of Modern Processes in Manufacturing and Production*, Vol. 2, No. 3, pp. 35-45, 2014.
- [2] M. Kashani, R. Khamedi, H. Ebrahimi, Tube electromagnetic forming coupled simulation by ANSYS and LS-DYNA and comparison with experimental results, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 5, pp. 159-164, 2015. (in Persian فارسی)
- [3] Y. Murakoshi, M. Takahashi, T. Sano, K. Hanada, H. Negishi, Inside bead forming of aluminum tube by electromagnetic forming, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 80-81, pp. 695-699, 1998.
- [4] H. Ebrahimi Haratmeh, A. R. Fallahi Arezoodar, M. Farzin, M. Attaran, S. Toroghi, Electromagnetic bulge forming: investigation of electrical and mechanical parameters on forming process, *6th international conference on electromagnetic processes of materials*, Germany, 2009.
- [5] C. Weddeling, S. Woodward, J. Nellesen, V. Psyk, M. Marré, A. Brosius, A.E. Tekkaya, G.S. Daehn, W. Tillmann, Development of design principles for form-fit joints in lightweight frame structures, *4th International Conference on High Speed Forming*, pp. 137-148, 2010.
- [6] A. R. Fallahi Arezoodar, H. Ebrahimi Haratmeh, M. Farzin, Numerical and experimental investigation of inward tube electromagnetic forming-electromagnetic study, *Advanced Materials Research*, Vol. 383-390, pp. 6710-6716, 2012.
- [7] A. El-Azab, M. Garnich, A. Kapoor, Modeling of the electromagnetic forming of sheet metals: state-of-the-art and future needs, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 142, No. 3, pp. 744-754, 2003.
- [8] M. Zohoor, B. Ghorbani, Numerical investigation of tube compression electromagnetic forming by finite element method and design of experiment, *Aerospace Mechanics Journal*, Vol. 11, No. 3, pp. 83-90, 2015. (in Persian فارسی)
- [9] L. Chunfeng, Z. Zhiheng, L. Jianhui, L. Zhong, The effect of tube length on magnetic pressure in tube electromagnetic bulging, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 166, No. 3, pp. 381–386, 2005.
- [10] J. P. M. Correia, M. A. Siddiqui, S. Ahzi, S. Belouettar, R. Davies, A simple model to simulate electromagnetic sheet free bulging process, *Internatioal Journal of Mechanical sciences*, Vol. 50, No. 10, pp. 1466-1475, 2008.

7- منابع

مهندسی مکانیک مدرس، فروردین 1395، دورہ 16، شمارہ 1