

آنالیز تحلیلی و عددی پارامترهای هندسی و فیزیکی موثر بر روی

استحکام اتصالات الکترومغناطیسی

بهمن قربانی^۲

دانشکده فنی و مهندسی

دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسلامشهر

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۱/۲۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۲/۱۱)

مهدی ظهور^۱

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

چکیده

اتصال قطعات با استفاده از فرایند شکل دهی الکترومغناطیسی یک روش نوین برای مونتاژ قطعات با هدایت الکتریکی بالا می باشد. در این تحقیق، اثر پارامترهای هندسی و فیزیکی مهم، از قبیل ولتاژ تخلیه، شعاع و عرض شیارهای مستطیلی در اتصالات اجسام تغییر شکل یافته توسط روش اجزاء محدود و طراحی آزمایش، بررسی شده است. پس از معرفی معادلات حاکم بر الکترومغناطیسی، خروجی این معادلات به شکل فشار توسط نرم افزار المان محدود بر روی قطعه کار اعمال شده است. در این تحلیل، قطعه کار به صورت تقارن محوری مدل شده و به دلیل نرخ کرنش بالا از مدل کرنش سختی جانسون - کوک برای توصیف رفتار پلاستیک ماده استفاده شده است. سرانجام، نتایج به دست آمده با نتایج موجود در مراجع معتبر دیگر مقایسه گردید. این نتایج، نشان می دهند که با افزایش ولتاژ تخلیه، پرشدگی شیار و سطح تماس بین لوله و ماندنرل افزایش یافته و همچنین ایجاد برش جزئی لوله در لبه شیار موجب ایجاد مکانیزم قفلی و افزایش استحکام می گردد.

واژه های کلیدی: شکل دهی الکترومغناطیسی، اتصال الکترومغناطیسی، استحکام

Analytical and Numerical Analysis of Geometrical and Physical Significant Parameters on the Strength of Electromagnetically Joints

M. Zohoor

Faculty of Mechanical Engineering

K.N.Toosi University of Technology

(Received: 13/April/2015; Accepted: 01/March/2017)

B. Ghorbani

Faculty of Engineering

Islamic Azad University Islamshahr Branch

ABSTRACT

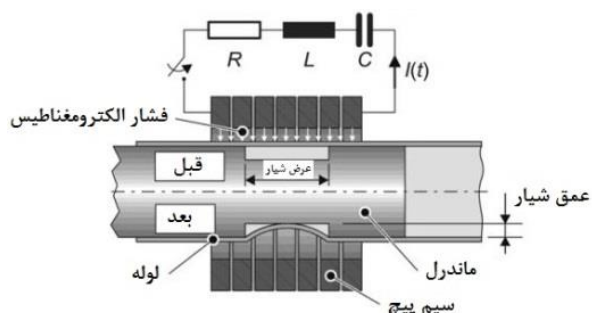
Electromagnetic forming is a high energy rate forming process which is applied for manufacturing and assembly of many parts that are used in automobile and aerospace industries. In this process, the electromagnetic body forces (Lorentz forces) are used to produce metallic parts. Joining high electrical conductivity parts by using electromagnetic forming process is as an innovative method. In this research work, the effect of important parameters of process such as discharge voltage, radius and width of rectangular groove on the strength of assembled products were studied by using finite element method and design of experiment. After introducing the governing equations, the output of these equations were applied in simulation as a pressure on work-piece. In this simulation, an axisymmetric model was used in analysis and Johnson-Cook theory was applied due to high strain rate to show the plastic behavior of materials. Finally, the numerical results were compared with the results reported by other researchers. As a result, the contact surface at bottom of the groove increases with the increase of the voltage energy and more filling groove, increasing strength of joint. Also Strength of joint increases, due to create partial shearing of the tube at the groove edge and interference stresses at the tube and mandrel interface.

Keywords: Electromagnetic Forming, Electromagnetic Joint, Strength

۱- دانشیار (نویسنده پاسخگو): mzohoor@kntu.ac.ir

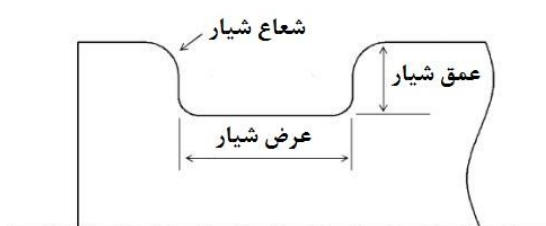
۲- مدرس: Bahman.Ghorbani64@gmail.com

۱- مقدمه



شکل (۲): شماتیک اتصال شکلی توسط فرایند الکترومغناطیس [۷].

برای مشخص کردن شکل بهینه شیار، سه حالت مثلثی، دایره‌ای و مستطیلی تعیین می‌شود. نتایج بررسی‌های تجربی نشان داده که شکل شیار یک تاثیر معنادار بر روی استحکام اتصال دارد. بیشترین استحکام اتصال برای شیارهای مستطیلی ملاحظه شده است. همان‌طوری‌که در شکل ۳ نشان داده می‌شود، عملکرد شیار مستطیلی به سه عامل عمق، عرض و شعاع شیار وابسته می‌باشد [۶].



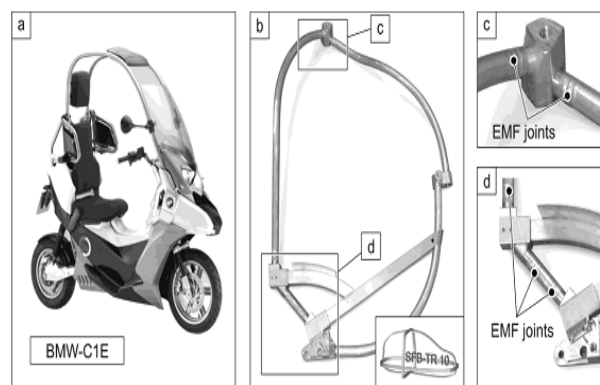
شکل (۳): پارامترهای شیار مستطیلی شکل.

بهلر^۵، گلوواشچنکو^۶ [۷] و پارک^۷ [۸] مطالعاتی را بر روی تاثیر پارامترهای مختلف شیار بر روی استحکام اتصال‌های شکلی انجام داده‌اند.

بهلر و گلوواشچنکو تاثیر عرض و عمق شیار را بر روی استحکام اتصال‌های شکلی، توسط شکل‌دهی الکترومغناطیس فشاری بررسی کردند. آن‌ها در بررسی‌هایشان فشارهای مختلف را به‌کار بردند، به‌طوری‌که فقط دیواره لوله ته شیار را لمس کند. آن‌ها دریافتند که افزایش عمق و کاهش عرض شیار استحکام اتصال قوی‌تر را فراهم می‌کند. در مقایسه با بهلر و گلوواشچنکو، پارک فشار ثابت در کارش به‌کار برد و افزایش در استحکام اتصال با افزایش عمق و عرض شیار را ملاحظه کرد.

یکی از پرجاذبه‌ترین روش‌های شکل‌دهی پرسرعت به لحاظ کاربردی، شکل‌دهی الکترومغناطیس^۱ است [۱] که از نیروی الکترومغناطیسی لورنتس^۲ جهت شکل‌دهی فلزات با قابلیت هدایت الکتریکی بالا، مانند آلیاژهای آلومینیم، منیزیم، مس، نقره، برنج و برخی فولادها استفاده می‌شود [۲].

این روش برای فرم‌دهی و اتصال فلزات به دیگر مواد استفاده می‌شود. کاربرد عمده این فرایند در کارخانجات فلزکاری شامل خودرو، هوافضا و مخصوصاً در قطعات مونتاژی می‌باشد [۳-۴]. تولید اقتصادی اتصالات استحکام بالا، یک چالش بزرگ برای تولید ساختار اتومبیل می‌باشد. امروزه تمرکز صنعت اتومبیل، استفاده از این فرایند جهت کاهش وزن بدنه خودرو به‌منظور بهینه‌سازی قوای محرکه، می‌باشد (شکل ۱).



شکل (۱): (a) وسیله نقلیه BMW-C1E و (b) ساختار پیشنهادی برای BMW-C1E ساخته شده در مرکز تحقیقات SFB/TR10 و (c) و (d) اتصالات ساخته شده با روش الکترومغناطیسی [۵].

برای اتصال الکترومغناطیسی دو مکانیزم مهم وجود دارد [۶]:

(۱) اتصال تداخلی^۳: در این نوع اتصال، لوله تغییر شکل شدید پلاستیکی بر روی ماندنرل می‌دهد و اتصال در نتیجه تداخل بین لوله و ماندنرل به‌وجود می‌آید.

(۲) اتصال شکلی^۴: لوله به‌داخل یک شیار که بر روی ماندنرل ایجاد شده، رانده می‌شود و اتصال در نتیجه قفل مکانیکی به‌وجود می‌آید (شکل ۲).

4- Form fit
5- Bühler
6- Golovashchenko
7- Park

1- Electro-Magnetic Forming (EMF)
2- Lorentz
3- Interference Fit

استفاده از روش طراحی آزمایش‌ها بررسی می‌شود. بدین منظور، با توجه به این‌که از میان مولفه‌ها، دو عامل عمق فرورفتگی و درصد نازک‌شدگی نقش مهمی بر استحکام اتصال دارند. لذا دو عامل مذکور به‌عنوان متغیرهای خروجی در نظر گرفته شده و عوامل (ولتاژ تخلیه، شعاع و عرض شیار) به‌عنوان متغیرهای ورودی در نظر گرفته شده‌اند. پس از طراحی آزمایش‌ها، عملیات شبیه‌سازی مطابق این طراحی انجام شده و متغیرهای خروجی (عمق فرورفتگی و درصد نازک‌شدگی) اندازه‌گیری و سپس با استفاده از روش آماری آنالیز واریانس^۱، تاثیر متغیرهای ورودی بر خروجی بررسی می‌گردد. مزیت این روش، امکان بررسی اثر تعامل عامل‌ها و به حداقل رساندن تعداد آزمایش‌های لازم است. به دلیل حجم نسبتاً بالا در تحلیل داده‌ها، از نرم‌افزار مینی‌تب^۲ استفاده شد.

۲- فرضیات

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

۱- در طول فرایند شکل‌دهی الکترومغناطیسی، تغییر شکل با سرعت بالا و در عرض چند میکروثانیه انجام می‌شود. در این حالت، میدان الکترومغناطیسی ممکن است به دلیل تغییرات ضریب خودالقائی متقابل بین سیم‌پیچ و لوله، تغییر کند. لذا اثر متقابل بین جابجایی لوله و چگالی میدان مغناطیسی قابل اغماض بوده و فرض شده که سرعت دیواره لوله بر روی میدان مغناطیسی تاثیر ندارد.

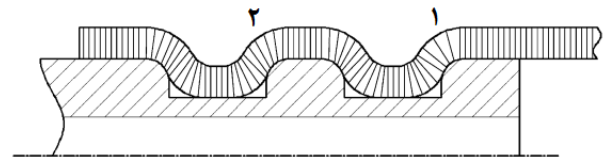
۲- لوله غیرمغناطیسی بوده و هدایت الکتریکی و نفوذپذیری آن ثابت فرض شده است.

۳- 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.

۳- معادلات الکترومغناطیسی

معادلات ماکسول برای یک سیستم مختصات استوانه‌ای، به صورت زیر می‌باشند [۹]:

اکثر تحقیقات نشان داده‌اند که استحکام اتصال‌های شکلی، با به کار بردن شیارهای چندتایی به‌طور معنادار افزایش می‌یابد. اما این‌که شیارها هم شکل باشند بی‌معنی است، زیرا استحکام اتصال را به‌طور منطقی فراهم نمی‌سازد. این رفتار ناشی از تمرکز تنش در انتهای لوله به علت کرنش تفاضلی عضو بیرونی (لوله) می‌باشد. شکل ۴ نشان می‌دهد که ناحیه ۱ تحت کرنش بیشتری نسبت به ناحیه ۲ می‌باشد [۸].



شکل (۴): شماتیک شرح کرنش تفاضلی [۸].

وقتی نیروی کششی بر عضوهای متصل شده اعمال می‌شود، عضو داخلی به‌عنوان یک جسم صلب جابجا شده و عضو خارجی تغییر شکل را تحمل می‌کند. تنش عضو بیرونی در ناحیه ۱، بیشترین بوده و به تدریج به سمت ناحیه ۲ کم می‌شود. در مقابل، تنش عضو داخلی در ناحیه ۲، بیشترین بوده و به تدریج به سمت ناحیه ۱ کم می‌شود. شیارها را از سمت ۱ به ۲ می‌شماریم؛ شیار اول، شیار نزدیک به انتهای عضو داخلی می‌باشد. اتصال‌هایی که نازک‌شدگی کمی به سمت شیار اول دارند، اتصال‌های قوی‌تری هستند [۸].

یک اتصال کامل، بایستی شرایط زیر را ارضاء کند [۸]:

الف) کاهش ضخامت در شیار اول کمینه یا از بین برود، زیرا ضخامت مواد پارامتر اساسی بر استحکام اتصال می‌باشد.
ب) اتصال باید طوری طراحی شود تا نازک‌شدگی به سمت شیار اول را کاهش دهد، بدین منظور، بایستی به سمت شیار اول عمق شیار کم‌تر و شعاع شیار بزرگ‌تر باشد. این طراحی تقریباً تنش و کرنش را در سراسر همه شیارها ثابت ساخته و به موجب آن استحکام اتصال افزایش می‌یابد.

در این نوشتار، اثر برخی پارامترهای مهم فرایند مانند ولتاژ تخلیه، شعاع و عرض شیار برای شیار تکی بر مبنای بیشترین جابجایی شعاعی و کم‌ترین نازک‌شدگی لوله آلومینیومی ۱۱۰۰ با قطر داخلی ۴۷ میلی‌متر و ضخامت ۰/۶ میلی‌متر توسط نرم‌افزار المان محدود آباکوس و نتایج حاصل از شبیه‌سازی با

1- ANOVA

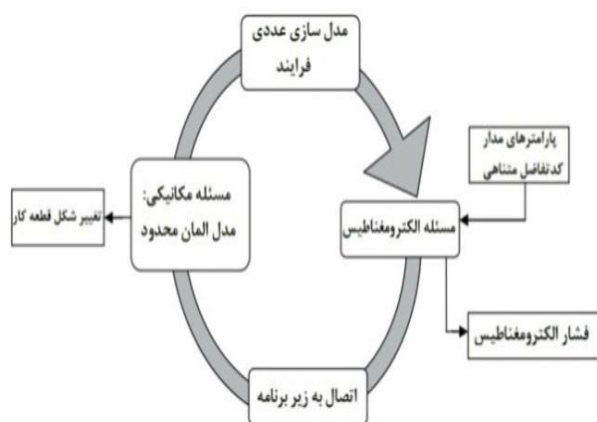
2- Minitab

۴- الگوریتم شبیه سازی

در شبیه سازی فرایند شکل دهی الکترومغناطیسی، بین نیروی الکترومغناطیس و شکل قطعه کار، در حین فرایند شکل دهی، تعامل وجود دارد، یعنی بین قسمت الکترومغناطیس و قسمت سازه کوپل وجود دارد. الگوریتم های کوپل ضعیف^۲ و کوپل ترتیبی^۳ برای شبیه سازی فرایند شکل دهی الکترومغناطیسی استفاده می شوند [۱۳-۱۰].

در روش کوپل ضعیف معادلات حاکم بر الکترومغناطیس مساله و معادلات حاکم بر قسمت سازه ای مساله 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 مساله لحاظ می شود.

روش استفاده شده در این تحقیق، بدین صورت است که، کد معادلات ارائه شده به زبان فورترن نوشته و سپس در قالب زیر برنامه قرار گرفت تا محاسبات الکترومغناطیسی را انجام داده و فشار الکترومغناطیسی اعمالی به لوله را محاسبه می کند. فشار الکترومغناطیسی فعال بر روی لوله در هر لحظه زمانی و در قسمت مکانیکی اعمال شده و تغییر شکل قطعه را سبب می شود. سپس محاسبات الکترومغناطیسی جدیدی بعد از به روز رسانی هندسه لوله انجام می شود. در هر گام زمانی این محاسبات انجام می شود. شکل ۵ الگوریتم استفاده شده را نشان می دهد.



شکل (۵): الگوریتم استفاده شده برای شبیه سازی فرایند شکل دهی الکترومغناطیس.

$$-\frac{1}{\mu_0 \sigma_w} \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{r^2} \right) B_r + \frac{\partial B_r}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} (v_z B_r - v_r B_z) \quad (1)$$

$$-\frac{1}{\mu_0 \sigma_w} \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) B_z + \frac{\partial B_z}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r(v_z B_r - v_r B_z)) \quad (2)$$

با فرض چشم پوشی از سرعت قطعه کار بر چگالی مغناطیس در طول فرایند شکل دهی ($v=0$)، معادلات شبه سکون ماکسول که برای لوله مدور کاربرد دارد به صورت زیر بوده و مولفه شعاعی B_r و محوری B_z چگالی میدان مغناطیسی به صورت زیر به دست می آیند [۹]:

$$-\frac{1}{\mu_0 \sigma_w} \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{r^2} \right) B_r + \frac{\partial B_r}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

$$-\frac{1}{\mu_0 \sigma_w} \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) B_z + \frac{\partial B_z}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

در روابط بالا μ_0 نفوذپذیری^۱ فضای خالی، σ_w قابلیت هدایت الکتریکی قطعه و t زمان را نشان می دهد. با فرض تقارن محوری، جریان گردابی فقط یک مولفه پیرامونی دارد که به صورت زیر معین می شود [۹]:

$$J_\theta = \frac{1}{\mu_0} \left(\frac{\partial B_r}{\partial z} - \frac{\partial B_z}{\partial r} \right) \quad (5)$$

نیروی لورنتس دارای مولفه های شعاعی و محوری می باشد که عبارتند از:

$$f_r = j_\theta B_z \quad (6)$$

$$f_z = -j_\theta B_r \quad (7)$$

مولفه های شعاعی و محوری فشار الکترومغناطیس با عمل انتگرال گیری به صورت زیر محاسبه می شوند:

$$P_r = \int_{z=0}^{z=lw} f_r dz \quad (8)$$

$$P_z = \int_{z=0}^{z=lw} f_z dz \quad (9)$$

که در روابط بالا l_w ارتفاع لوله می باشد.

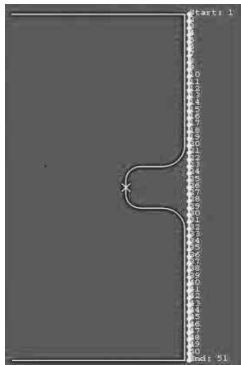
2- Loose-coupled
3- Sequential-coupled

1- Permeability

جدول (۲): خواص فیزیکی و مکانیکی لوله AL1100-H12 [۱۶].

چگالی Kgm-3	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام نهایی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	ضریب پواسون
۲۷۰۰	۱۴۸/۳۶۱	۳۴۵/۵۱۳	۶۵/۷۶۲	۰/۳

برای انجام شبیه‌سازی از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس استفاده شد. مدل هندسی شامل یک ماندلر و لوله می‌باشد. به دلیل تقارن محوری لوله و ماندلر، شبیه‌سازی در حالت دو بعدی انجام گرفت (شکل ۶). لوله به صورت ماده شکل پذیر همگن و همسان گرد و با المان سیمی تقارن محوری (SAX1) و هم‌چنین ماندلر به صورت صلب تحلیلی مدل شده و تمام درجات آزادی ماندلر بسته (صلب) شده است. جهت مدل کردن اصطکاک بین ماندلر و لوله از مدل کلمب استفاده و مقدار ضریب اصطکاک ۰.۱۵ فرض شده است.



شکل (۶): مدل ۲ بعدی المان محدود به همراه شماره گره‌ها بر روی لوله.

۶- طراحی آزمایش

عوامل مختلفی بر روی استحکام نهایی قطعات مونتاژ شده حاصل از فرایند الکترومغناطیسی می‌توانند موثر باشند. ولتاژ تخلیه، عرض و شعاع شیار نقش مهمی بر روی جابجایی شعاعی دیواره لوله داخل شیار و درصد نازک‌شدگی داشته به همین دلیل، در این تحقیق اثر این عوامل بررسی می‌شود. (جدول ۳) به منظور مشخص کردن حداکثر مقدار نازک‌شدگی در دیواره لوله از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$\% \text{Thinning} = \frac{t_0 - t_f}{t_0} \times 100 \quad (11)$$

که در آن، t_0 ضخامت اولیه دیواره لوله و t_f ضخامت نهایی دیواره لوله می‌باشد.

۵- شبیه‌سازی المان محدود

برای انجام شبیه‌سازی، از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس استفاده شده است. مدل هندسی شامل یک قالب و لوله می‌باشد که به دلیل تقارن محوری، شبیه‌سازی در حالت دو بعدی انجام گرفت. قالب را به صورت صلب تحلیلی در نظر گرفته و تمام درجات آزادی آن سلب شده است.

به منظور اعمال فشار در شبیه‌سازی، از زیربرنامه VDLOAD استفاده شد. فشار الکترومغناطیس به دست آمده از زیربرنامه، در نرم‌افزار آباکوس به صورت فشار مکانیکی بر روی مدل اعمال و تغییر شکل قطعه را منجر می‌شود. مطابق مرجع [۱۴]، از افزایش حرارت به دلیل جریان القایی صرف نظر شده است. گام زمانی استفاده شده جهت پایداربودن فرایند شبیه‌سازی $0.1 \mu\text{s}$ و کل فرایند شکل‌دهی الکترومغناطیس مورد بررسی [۳] $3.5 \mu\text{s}$ به طول می‌انجامد.

لوله به صورت ماده شکل پذیر همگن و همسان گرد، و مدل ماده در این شبیه‌سازی به علت بالابودن سرعت شکل‌دهی، مدل ویسکوپلاست جانسون- کوک در نظر گرفته شد. این معادله به صورت زیر می‌باشد [۱۵]:

$$\bar{\sigma} = [A + B\bar{\epsilon}^n] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\dot{\bar{\epsilon}}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_f}{T_m - T_f} \right)^m \right] \quad (10)$$

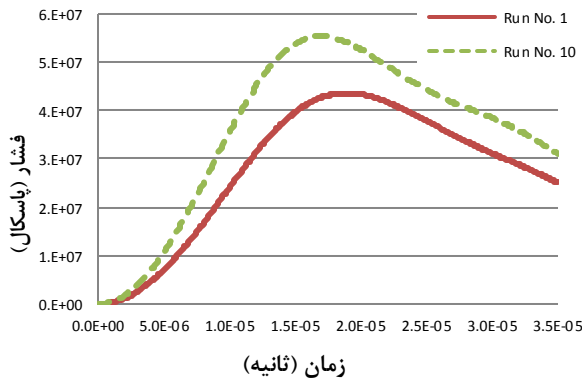
در این معادله، $\bar{\sigma}$ تنش سیلان، A تنش تسلیم، n توان کرنش سختی، C ضریب حساسیت به نرخ کرنش، $\dot{\bar{\epsilon}}$ نرخ کرنش پلاستیک لحظه‌ای و $\dot{\bar{\epsilon}}_0$ نرخ کرنش پلاستیک مرجع، T دمای قطعه کار، T_m دمای ذوب ماده، T_f دمای تبدیل (معمولاً دمای محیط)، m ضریب ماده که نرم شدن ماده در دماهای بالا می‌باشد. برای به دست آوردن ضرایب معادله جانسون- کوک نیاز به آزمایش‌های پیکینسون با نرخ کرنش بالا و دماهای مختلف می‌باشد. لذا به دلیل عدم امکان انجام عملی این آزمایش، در این پژوهش از آلومینیوم ۱۱۰۰ با خواص مطابق جدول‌های ۱-۲ و طبق مرجع [۱۱] استفاده شد.

جدول (۱): ضرایب جانسون- کوک لوله AL1100-H12 [۱۶].

$\dot{\bar{\epsilon}}_0$	n	m	C	B(MPa)	A(MPa)
۱	۰/۱۸۳	۰/۸۵۹	۰/۰۰۱	۳۴۵/۵۱۳	۱۴۸/۳۶۱

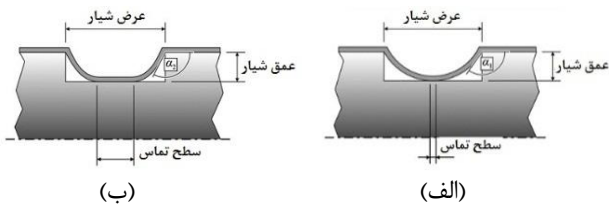
لوله به داخل شیار می‌گردد که موافق با مراجع [۳] و [۱۸] می‌باشد (شکل ۷).

هم‌چنین لازم به توضیح است که فشار الکترومغناطیسی به شکل موج سینوسی بوده و نیم سیکل ابتدایی در شکل ۷ نمایش داده شده است.



شکل (۷): تغییرات فشار نسبت به زمان برای گره وسط لوله.

با ثابت بودن عمق شیار، افزایش در ولتاژ تخلیه باعث می‌گردد که شیار بیشتر از شرایط مشخص شده پر شود. همان‌طوری‌که در شکل ۸ نشان داده شده، با افزایش ولتاژ تخلیه، سطح بیشتر لوله با ته شیار در تماس قرار می‌گیرد. در طول فرایند شکل‌دهی، اتصال تداخلی به همراه اتصال شکلی بین لوله و ماندرل رخ می‌دهد. تغییر شکل پلاستیک لوله یک تغییر شکل الاستیک کوچک بر روی ماندرل ایجاد می‌کند. در نتیجه تنش تداخلی در صفحه تماس بین لوله و ماندرل ایجاد می‌شود. این تنش تداخلی باعث خواهد شد که لوله در زمان تست کشش مقاومت کند و به موجب آن استحکام اتصال افزایش می‌یابد.



شکل (۸): الف) شماتیک اتصال ساخته شده با کمترین ولتاژ تخلیه برای پر کردن شیار، ب) شماتیک اتصال ساخته شده با ولتاژ تخلیه بالاتر [۵].

دلیل دیگر افزایش استحکام اتصال با بالا رفتن ولتاژ، کاهش زاویه α دیواره لوله در لبه شیار می‌باشد. با افزایش در ولتاژ تخلیه، کاهش در زاویه α و تغییر شکل بیشتر در لبه شیار اتفاق می‌افتد که نیازمند نیروی بیشتر در طول تست کشش می‌باشد.

جدول (۳): پارامترهای مورد بررسی به همراه سطوح آنها.

پارامتر	سطح پایین	سطح میانی	سطح بالا
ولتاژ تخلیه (ولت) (A)	۴۳۰۰	-	۵۳۰۰
عرض شیار (میلی متر) (B)	۳	۶	۹
شعاع شیار (میلی متر) (C)	۳	۴/۵	۶

با استفاده از طرح عاملی کامل [۱۷]، تعداد $2 \times 3 \times 3 = 18$ آزمایش ممکن برای طرح مورد بررسی وجود دارد (جدول ۴).

جدول (۴): ماتریس آزمایش به همراه نتایج شبیه‌سازی.

شماره آزمایش	ولتاژ تخلیه (ولت)	عرض شیار (میلی متر)	شعاع شیار (میلی متر)	درصد نازک شدن شیار
۱	۴۳۰۰	۳	۳	۲/۵۸۳
۲	۴۳۰۰	۳	۴/۵	۲/۶۳۳
۳	۴۳۰۰	۳	۶	۱/۹۵۰
۴	۴۳۰۰	۶	۳	۲/۸۵۰
۵	۴۳۰۰	۶	۴/۵	۲/۱۱۶
۶	۴۳۰۰	۶	۶	۰/۷۵
۷	۴۳۰۰	۹	۳	۲/۱۱۶
۸	۴۳۰۰	۹	۴/۵	۰/۶۵
۹	۴۳۰۰	۹	۶	۰/۱۳۳
۱۰	۵۳۰۰	۳	۳	۳/۴۱۶
۱۱	۵۳۰۰	۳	۴/۵	۳/۸
۱۲	۵۳۰۰	۳	۶	۳/۲۵
۱۳	۵۳۰۰	۶	۳	۴/۵
۱۴	۵۳۰۰	۶	۴/۵	۳/۶۸۳
۱۵	۵۳۰۰	۶	۶	۲/۱۱۶
۱۶	۵۳۰۰	۹	۳	۳/۷۱۶
۱۷	۵۳۰۰	۹	۴/۵	۲/۰۸۳
۱۸	۵۳۰۰	۹	۶	۰/۵۵

۷- نتایج و بحث

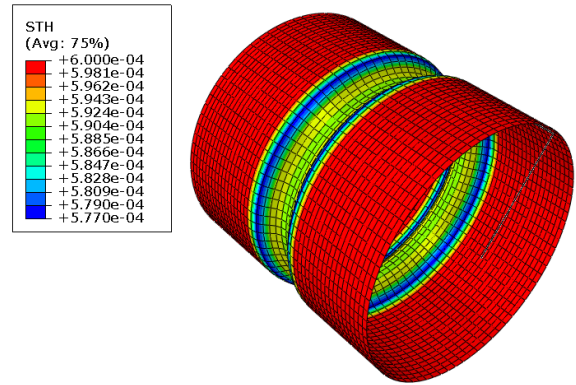
در این قسمت اثر ولتاژ تخلیه شده و همچنین اثر عرض و شعاع شیار مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

۷-۱- اثر ولتاژ تخلیه

افزایش ولتاژ تخلیه، منجر به افزایش چگالی میدان مغناطیسی و فشار مغناطیسی شده و در نتیجه باعث افزایش فروروی دیواره

۲-۷- اثر عرض و شعاع شیار

در شبیه‌سازی و نتایج تجربی [۳ و ۶] مشاهده شد که بیشترین نازک‌شدگی در ناحیه تماس با شعاع شیار به دلیل تنش‌های کششی رخ می‌دهد (شکل ۹).

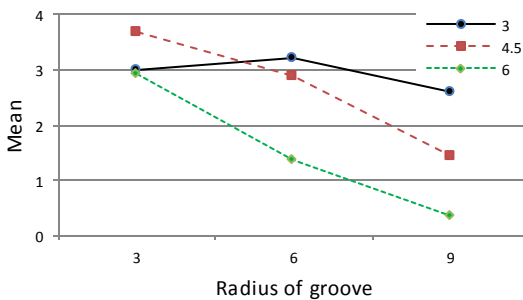


شکل (۹): توزیع ضخامت در راستای طول لوله.

گشتاور خمشی بر ضخامت دیواره لوله موجب کاهش نازک‌شدگی می‌گردد. شکل ۱۱ نشان می‌دهد که افزایش شعاع شیار باعث کاهش نازک‌شدگی در پروفیل شیار بعد از فرم‌دهی می‌شود. همچنین با افزایش عرض شیار، نازک‌شدگی کاهش می‌یابد و دلیل اصلی آن، تمایل بیشتر ورق به خم‌شدن می‌باشد.

افزایش عرض شیار، سطح تماس بیشتری در ته شیار به‌وجود می‌آورد که منجر به یک اتصال تداخلی بزرگ‌تر و استحکام قوی‌تر می‌شود. اما یک محدودیت در اندازه وجود دارد، زیرا افزایش عرض شیار بیشتر از یک نقطه مشخص باعث چروکیدگی می‌شود و همچنین به دلیل افزایش وزن محصول هزینه مواد از لحاظ اقتصادی نیز مقرون به صرفه نیست.

Interaction plot for thinning



شکل (۱۱): اثرات متقابل پارامترها بر روی نازک‌شدگی.

۸- نتیجه‌گیری

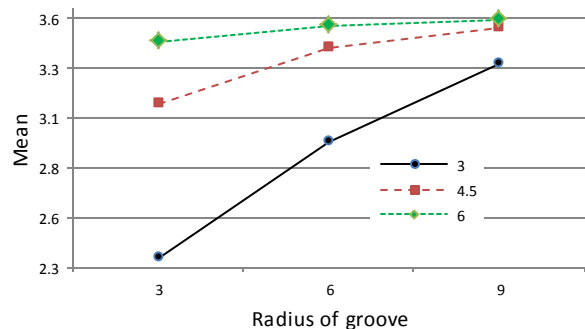
فرایند اتصال لوله‌های آلومینیومی به وسیله شکل‌دهی الکترومغناطیسی که یک رویکرد مناسب برای تولید ساختار سبک اتومبیل می‌باشد، به صورت عددی و تحلیلی مطالعه شد و نتایج زیر حاصل گردید:

۱- با افزایش ولتاژ تخلیه، چگالی میدان مغناطیسی و فشار مغناطیسی افزایش یافته که منجر به افزایش جابجایی شعاعی می‌گردد و با ثابت بودن عمق شیار، منجر به پرشدن بیشتر شیار و در نتیجه استحکام بالاتر اتصال می‌گردد.

۲- با افزایش عرض شیار، نازک‌شدگی کاهش می‌یابد که به دلیل تمایل بیشتر ورق به خم‌شدن می‌باشد. افزایش عرض شیار، سطح تماس بیشتری در ته شیار به‌وجود می‌آورد که منجر به یک اتصال تداخلی بزرگ‌تر و استحکام قوی‌تر می‌شود

افزایش عرض و شعاع شیار منجر به افزایش گشتاور خمشی اعمالی بر روی ورق شده و در نتیجه جابجایی شعاعی افزایش می‌یابد. اما همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌گردد، با افزایش عرض شیار، اثر شعاع شیار خیلی کمتر و یا بی‌اثر می‌شود. به بیان دیگر، اثر عرض شیار خیلی بیشتر از شعاع شیار می‌باشد.

Interaction plot for displacement



شکل (۱۰): اثرات متقابل پارامترها بر روی جابجایی شعاعی.

هنگامی که عرض و شعاع شیار کوچک می‌باشد، فضای کافی جهت مواد دیواره لوله وجود نداشته و عمق فروروی کاهش یافته و نازک‌شدگی نیز کاهش می‌یابد. سپس با افزایش شعاع شیار فضای مناسب جهت فروروی دیواره لوله به داخل شیار وجود داشته و تنش‌های کششی موجب افزایش اندک نازک‌شدگی گشته و در نهایت با افزایش شعاع شیار و افزایش

- Processing Technology, Vol. 211, pp. 925-935, 2011.
8. Park, Y-B., Kim, H-Y., Oh, S-Ik. "Design of Axial/Torque Joint Made by Electromagnetic Forming", Thin-Walled Structures, Vol. 43, pp. 826-844, 2005.
 9. Siddiqui, M.A. "Numerical Modeling and Simulation of Electromagnetic Forming Process", PhD thesis, Strasbourg University, 2009.
 10. Bartels, G., Schätzing, W., Scheibe, H.-P., Leone, M. "Comparison of Two Different Simulation Algorithms for the Electromagnetic Tube Compression", Int J Mater Form, Vol. 2 No. 1, pp. 693-696, 2009.
 11. Pérez, I., Aranguren, I., González, B. and Eguia, I. "Electromagnetic Forming: A New Coupling Method", Int J Mater Form, Vol. 2 No. 1, pp. 637-640, 2009.
 12. Haiping, Y.U., Chunfeng, L.I., Jianghua D.E.N.G., "Sequential Coupling Simulation for Electromagnetic-mechanical Tube Compression by Finite Element Analysis", journal of materials processing technology, Vol. 209, pp. 707-713, 2009.
 13. Bartels, G., Schätzing, W., Scheibe, H.-P., Leone, M. "Models for Electromagnetic Metal Forming", 3rd International Conference on High Speed Forming, 2008.
 14. Jablonski, J., Wrinkler, R. "Analysis of the electromagnetic forming process", International Journal of mechanical sciences, Vol. 20, pp. 315-25, 1978.
 15. Johnson, G. R. and Cook, W. H., "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, 1983.
 16. Gupta, N.K., Iqbal, M.A., Sekhon, G.S. "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, pp. 1921-1944, 2006.
 17. Montgomery, D.C, "Design and Analysis of Experiments". 5th Edition, John Wiley & Sons Inc, New York, 2001.
 18. Zohoor, M., Ghorbani, B., Mohammadi Nia, M., Fallahi Arezoodar, A.R., "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)
- و هم‌چنین سبب افزایش نیروهای اصطکاکی در هنگام دوران می‌شود.
- ۳- افزایش شعاع شیار باعث کاهش نازک‌شدگی در پروفیل شیار بعد از فرم‌دهی می‌شود که البته با افزایش عرض شیار، تاثیر شعاع شیار کاهش می‌یابد. هم‌چنین شعاع خیلی کوچک باعث افزایش برش در لبه شیار می‌شود.
- ۴- ایجاد برش جزئی لوله در لبه شیار با بهینه‌نمودن شعاع شیار، موجب ایجاد مکانیزم قفلی و افزایش استحکام اتصال می‌گردد.
- ۵- وجود تنش‌های تداخلی در سطح مشترک لوله و ماندربل موجب تقویت اتصال شده و پیشنهاد می‌گردد برای افزایش اتصال تداخلی، سطوح ماندربل آج‌زنی گردد.
- ## ۹- مراجع
1. Zohoor, M., Ghorbani, B. "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, 2017. (In Persian)
 2. Sedighi, M., Karimi-nemch, H., Khandai, M. "Effect of Sheet Thickness on Magnitude and Distribution of Magnetic Force in Electromagnetic Sheet Metal Forming Process", Applied mechanics and materials, Vol.110-116, pp.3506-3511, 2012.
 3. Fallahi Arezoodar, A.R., Ebrahimi, H. and Farzin, M. "Numerical and Experimental Investigation of Inward Tube Electromagnetic forming-Electromagnetic Study", Advanced Materials Research, Vol. 383-390, pp. 6710-6716, 2012.
 4. El-Azab, A., Garnich, M. and Kapoor, A, "Modeling of the Electromagnetic Forming of Sheet Metals: State-of-the-Art and Future Needs", J. Mat. Proc. Tech., Vol. 142, pp. 744-754, 2003.
 5. Weddeling, C., Woodward, S., Nellesen, J. Psyk, V., Marré, M., Brosius, A., Tekkaya, A. E., Daehn, G. S., Tillmann, W. "Development of design principles for form-fit joints in lightweight frame structures", 4th International Conference on High Speed Forming, 2010.
 6. Van Wouterghem, M., Vanhulsel, P. "Magnetic Pulse Crimping of Mechanical Joints", MSc. thesis, Gent University, 2011.
 7. Christian, W., Steven, T., Woodward, M. M., Nellesen, J., Verena Psyk, A., Tekkaya, E., Tillmann, W. "Influence of Groove Characteristics on Strength of Form-fit Joints", Journal of Materials

متناهی مولفه های شعاعی و محوری میدان مغناطیسی بر حسب زمان به ترتیب طبق فرمول های زیر بدست می آید.

$$\begin{aligned}
 & B_r^{t+1}(i, j) \\
 &= \frac{1}{\mu_0 \sigma_w} \frac{\Delta t}{(\Delta r)^2} (B_r^t(i, j+1) \\
 &+ B_r^t(i, j-1)) \\
 &- \frac{\Delta t}{2\Delta r(a+j\Delta r)} \frac{1}{\mu_0 \sigma_w} (B_r^t(i, j-1) \\
 &+ B_r^t(i, j+1)) \\
 &- \frac{\Delta t}{\mu_0 \sigma_w} \left(\frac{2}{\Delta r^2} + \frac{2}{\Delta h^2} \right. \\
 &\left. + \frac{1}{(a+j\Delta r)^2} \right) (B_r^t(i, j) + B_r^t(i, j)) \\
 &+ \frac{1}{\mu_0 \sigma_w} \frac{\Delta t}{(\Delta h)^2} (B_r^t(i+1, j) \\
 &+ B_r^t(i-1, j))
 \end{aligned} \quad \text{(پ-۳)}$$

$$\begin{aligned}
 & B_z^{t+1}(i, j) \\
 &= \frac{1}{\mu_0 \sigma_w} \frac{\Delta t}{(\Delta r)^2} (B_z^t(i, j+1) \\
 &+ B_z^t(i, j-1)) \\
 &- \frac{\Delta t}{2\Delta r(a+j\Delta r)} \frac{1}{\mu_0 \sigma_w} (B_z^t(i, j-1) \\
 &+ B_z^t(i, j+1)) \\
 &- \frac{\Delta t}{\mu_0 \sigma_w} \left(\frac{2}{\Delta r^2} + \frac{2}{\Delta h^2} \right. \\
 &\left. + \frac{1}{(a+j\Delta r)^2} \right) (B_z^t(i, j) + B_z^t(i, j)) \\
 &+ \frac{1}{\mu_0 \sigma_w} \frac{\Delta t}{(\Delta h)^2} (B_z^t(i+1, j) \\
 &+ B_z^t(i-1, j))
 \end{aligned} \quad \text{(پ-۴)}$$

یک طرف روابط بالا در زمان $t+1$ و طرف دیگر آن در زمان t می باشد.

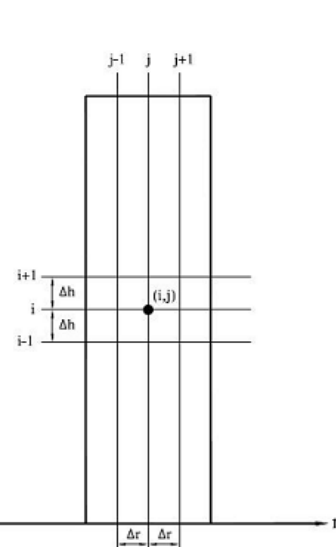
با مشخص بودن میدان مغناطیسی، جزء پیرامونی جریان القایی بر حسب زمان به صورت زیر بدست می آید.

$$\begin{aligned}
 & J^t(i, j) \\
 &= \frac{1}{\mu_0} \left(\frac{B_r^t(i+1, j) - B_r^t(i-1, j)}{2\Delta h} \right. \\
 &\left. - \frac{B_z^t(i, j+1) - B_z^t(i, j-1)}{2\Delta r} \right)
 \end{aligned} \quad \text{(پ-۵)}$$

پیوست

روش حل تفاضل متناهی معادلات شکل دهی الکترومغناطیسی لوله

برای حل معادلات پاره ای از روش تفاضل محدود استفاده شده است. در شکل زیر شبکه مش در سیستم مختصات استوانه ای به صورت شماتیک آورده شده است.



شکل (پ-۱): شماتیک شبکه مش بندی شده.

قطعه کار به مش هایی با ابعاد $\Delta r \times \Delta h$ و به صورت یکنواخت تقسیم بندی شده است. در این شبکه هر نقطه با مختصات (i, j) به صورت زیر تعریف می شود:

$$\begin{aligned}
 (r_j, z_i) &= (a + j\Delta r, i\Delta h) & 0 \leq i \\
 & & \leq n \quad \text{and} \quad 0 \leq j \\
 & & \leq m
 \end{aligned} \quad \text{(پ-۱)}$$

مقدار فاصله مکانی در جهت شعاع و ارتفاع لوله به ترتیب Δr و Δh می باشند، که از روابط زیر بدست می آیند.

$$\Delta r = \frac{h_w}{m} \quad \text{(پ-۲)}$$

$$\Delta h = \frac{l_w}{n}$$

در روابط فوق a شعاع داخلی لوله، h_w ضخامت لوله و l_w طول لوله می باشد.

معادلات با مشتقات جزئی باید از روش تفاضل متناهی و روی هندسه لوله حل شوند، لذا با استفاده از روش حل تفاضلات

مولفه‌های شعاعی و محوری نیروی لورنتس به صورت زیر به دست می‌آیند.

$$f_r^t(i, j) = J^t(i, j) B_z^t(i, j) \quad (\text{پ-۶})$$

$$f_z^t(i, j) = J^t(i, j) B_r^t(i, j)$$

در آخر فشار الکترومغناطیس فعال بر لوله با معادلات زیر تخمین زده می‌شوند.

$$P_r^t(i, j) = \sum_{i=0}^{n-1} \left[\frac{F_r^t(i, j) + F_r^t(i+1, j)}{2} \Delta r \right] \quad (\text{پ-۷})$$

$$P_z^t(i, j) = \sum_{i=0}^{n-1} \left[\frac{F_z^t(i, j) + F_z^t(i+1, j)}{2} \Delta r \right]$$