

بررسی تحلیلی و عددی پارامترهای مؤثر بر استحکام اتصال لوله آلومینیومی مونتاژ شده به روش

الکترومغناطیس

مهدی ظهور^{۱*}، بهمن قربانی^۲

تاریخ دریافت: ۷ دی ۹۲ تاریخ پذیرش: ۵ اسفند ۹۲

چکیده

شکل دهی الکترومغناطیسی یکی از روش های شکل دهی پرسرعت است که در آن از نیروی الکترومغناطیس لورنتس استفاده می شود. اتصال قطعات با این فرایند، یک روش نوین برای مونتاژ قطعات است. در این تحقیق، اثر برخی پارامترهای مهم ورودی فرایند، مانند انرژی تخلیه و شعاع و عرض شیارهای مستطیلی در اتصالات لوله آلومینیومی، تغییر شکل یافته توسط نرم افزار المان محدود و با استفاده از روش طراحی آزمایش ها، بررسی شده است. پس از معرفی معادلات حاکم الکترومغناطیسی، خروجی این معادلات به شکل فشار 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 تجربی موجود در مراجع معتبر دیگر، مقایسه گردید و تطابق خوبی حاصل شد. این نتایج نشان می دهد که افزایش انرژی تخلیه، منجر به افزایش عمق فرورفتگی و پرشدن بیشتر شیار و در نتیجه افزایش استحکام اتصال می گردد. همچنین ایجاد برش جزئی لوله در لبه شیار و تنش های تداخلی در سطح مشترک لوله و ماندلر، موجب تقویت اتصال می گردد.

واژگان کلیدی: شکل دهی الکترومغناطیسی، المان محدود، شیار، لوله آلومینیومی، استحکام اتصال.

۱. مقدمه

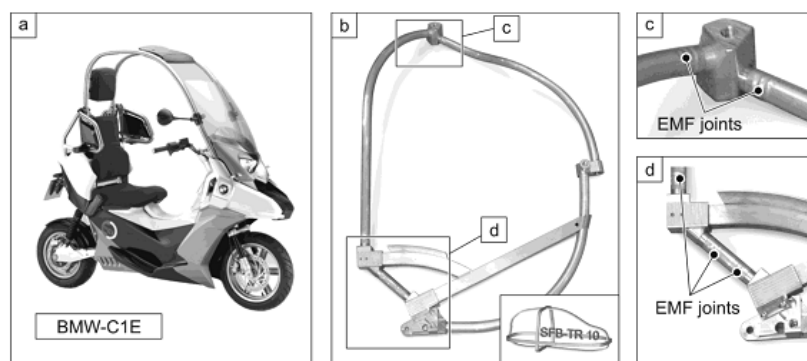
کاربرد عمده این فرایند در کارخانجات فلزکاری شامل: خودروسازی، هوافضا و مخصوصاً در قطعات مونتاژی است [۳ و ۴].

تولید اقتصادی اتصالات با استحکام بالا، یک چالش بزرگ برای تولید ساختار اتومبیل است. امروزه تمرکز صنعت اتومبیل در استفاده از این فرایند برای کاهش وزن بدنه خودرو به منظور بهینه سازی قوای محرکه، است. (شکل ۱)

یکی از پرجاذبه ترین روش های شکل دهی پرسرعت به لحاظ کاربردی، شکل دهی الکترومغناطیسی^۱ است [۱]، که از نیروی الکترومغناطیسی لورنتس^۲ جهت شکل دهی فلزات با قابلیت هدایت الکتریکی بالا، مانند آلیاژهای آلومینیم، منیزیم، مس، نقره، برنج و برخی فولادها استفاده می شود [۲]. این روش برای فرم دهی و اتصال فلزات به دیگر مواد، استفاده می شود.

^۱. دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی mzohoor@kntu.ac.ir

^۲. کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی

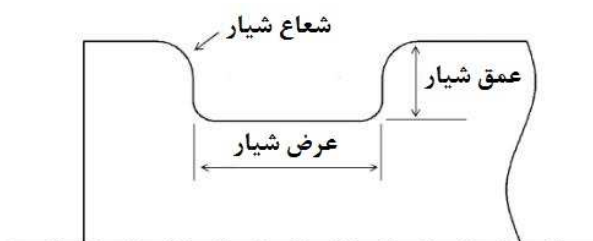


شکل ۱: (a) وسیله نقلیه BMW-C1E و (b) ساختار پیشنهادی برای BMW-C1E ساخته شده در مرکز تحقیقات SFB/TR10 و (c و d) اتصالات ساخته شده با روش الکترومغناطیسی [۵]

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

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

۲. اتصال شکلی^۴: لوله به داخل یک شیار که بر روی ماندردل ایجاد شده، رانده می‌شود و اتصال در نتیجه قفل مکانیکی بوجود می‌آید. (شکل ۲)



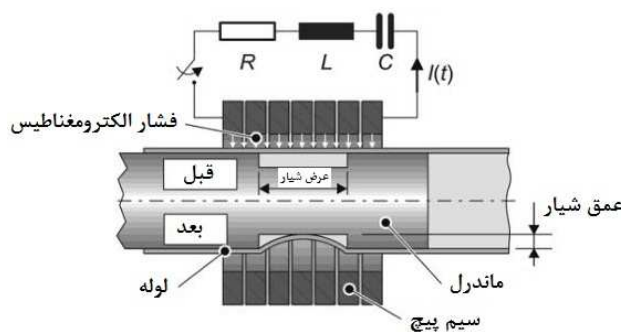
شکل ۳: پارامترهای شیار مستطیلی شکل

بهرلر^۵ و گلوواشچنکو^۶ [۷] و پارک^۷ [۸] مطالعاتی بر روی تأثیر پارامترهای مختلف شیار بر روی استحکام اتصال، اتصالاتی شکلی انجام داده‌اند.

بهرلر و گلوواشچنکو در کارهایشان تأثیر عرض و عمق شیار را بر روی استحکام اتصالاتی 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 بهرلر و گلوواشچنکو، پارک فشار ثابت در کارش به‌کار برد و افزایش در استحکام اتصال با افزایش عمق و عرض شیار را ملاحظه کرد.

اکثر تحقیقات نشان داده‌اند که استحکام اتصالاتی شکلی، با بکاربردن شیارهای چندتایی، به‌طور معنادار افزایش می‌یابد. یک شیار تکی، استحکام کامل ماده را فراهم نمی‌کند؛ بلکه می‌بایست



شکل ۲: شماتیک اتصال شکلی توسط فرایند الکترومغناطیس

برای مشخص کردن شکل بهینه شیار، سه حالت مثلی و دایره‌ای و مستطیلی تعیین می‌شود.

نتایج بررسی‌های تجربی نشان داده که شکل شیار، تأثیر معنادار بر روی استحکام اتصال دارد. بیشترین استحکام اتصال برای شیارهای مستطیلی بر اثر وجود برش جزئی لوله در لبه‌های شیار ملاحظه شده است. عملکرد شیار مستطیلی به سه عامل عمق و

طراحی آزمایش‌ها بررسی می‌شود. بدین‌منظور 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 (انرژی تخلیه و 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، تأثیر متغیرهای ورودی بر خروجی بررسی می‌گردد. مزیت این روش، امکان بررسی اثر تعامل عامل‌ها و به‌حداقل‌رساندن تعداد آزمایش‌های لازم است. به دلیل حجم نسبتاً بالا در تحلیل داده‌ها، از نرم‌افزار مینی‌تب^۸ استفاده شد.

۲. فرضیات

با توجه به ماهیت فیزیکی پیچیده این فرایند، فرضیه‌های زیر برای ساده‌سازی در نظر گرفته شده است:

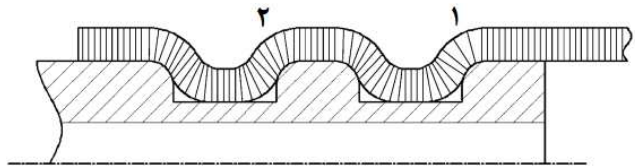
۱. در طول فرایند شکل‌دهی الکترومغناطیس، قطعه‌کار در عرض چند میکروثانیه به سرعت خیلی بالا دست یافته و از سیم پیچ دور می‌شود. در این حالت، میدان الکترومغناطیس به دلیل تغییرات اندوکتانس متقابل بین سیم‌پیچ و قطعه‌کار، تغییر می‌کند؛ لذا می‌توان از اثر متقابل بین جابه‌جایی قطعه‌کار و چگالی میدان مغناطیسی چشم‌پوشی کرد و فرض کرد که سرعت ورق بر روی میدان مغناطیسی تأثیر ندارد.

۲. با توجه به اینکه فرایند شکل‌دهی الکترومغناطیس در زمان خیلی کوتاه انجام می‌شود؛ لذا اندوکتانس در طول فرایند شکل‌دهی ثابت فرض می‌شود.

۳. به دلیل تقارن فرایند، یک شکل‌بندی تقارن‌محوری برای قطعه‌کار و سیم‌پیچ برای حل عددی استفاده شده است. در نتیجه، میدان مغناطیس و فشار الکترومغناطیسِ اعمالی بر روی لوله در جهت پیرامونی تغییر نمی‌کند. بنابراین، سیستم مختصات استوانه‌ای برای مسئله حاضر معرفی شده است. محور Z محور تقارن شکل‌بندی است.

۴. خواص الکترومغناطیس در دما و زمان ثابت فرض شده و تأثیرات حرارت در نظر گرفته نشده است.

دو شیار یا بیشتر با شکل مشابه استفاده شود؛ اما اینکه دو شیار هم شکل باشند بی معنی است؛ زیرا استحکام اتصال را منطقاً فراهم نمی‌سازد. این رفتار ناشی از تمرکز تنش در انتهای لوله به علت کرنش تفاضلی عضو بیرونی (لوله) است. شکل (۴) نشان می‌دهد که ناحیه ۱ تحت کرنش بیشتری نسبت به ناحیه ۲ است.



شکل ۴: شماتیک شرح کرنش تفاضلی [۸]

وقتی نیروی کششی بر عضوهای متصل شده اعمال می‌شود، عضو داخلی به‌عنوان یک جسم صلب جابه‌جا می‌شود 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 یعنی شیار نزدیک به انتهای عضو داخلی.

اتصال‌هایی که نازک‌شدگی کمی به سمت شیار اول دارند، اتصال‌های قویتری هستند. این متأثر از تمرکز تنش در لبه اتصال است.

یک اتصال کامل، می‌بایستی شرایط زیر را ایجاد کند [۸]:

الف. کاهش ضخامت در شیار اول کمینه از بین برود؛ زیرا ضخامت مواد، پارامتر اساسی بر استحکام اتصال هستند.

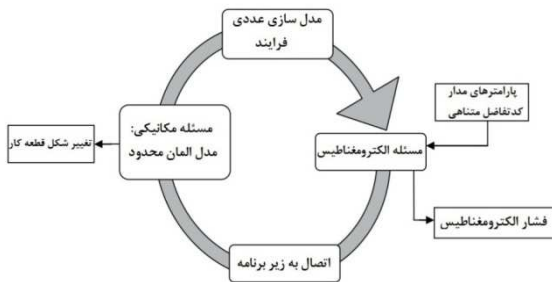
ب. اتصال باید طوری طراحی شود تا نازک‌شدگی به سمت شیار اول را کاهش دهد. بدین‌منظور می‌بایستی به سمت شیار اول، عمق شیار کم‌تر و شعاع شیار بزرگ‌تر باشد. این طراحی تقریباً تنش و کرنش را در سراسر همه شیارها ثابت ساخته و به موجب آن استحکام اتصال، افزایش می‌یابد.

قطعه‌کار استفاده‌شده در این تحقیق، یک لوله از جنس آلومینیم ۱۱۰۰ با قطر داخلی ۴۷ میلی‌متر و ضخامت ۰/۶ میلی‌متر است. در این نوشتار اثر برخی پارامترهای مهم فرایند مانند انرژی تخلیه و شعاع و عرض شیار برای شیار تکی بر مبنای بیشترین جابه‌جایی شعاعی و کمترین نازک‌شدگی قطعه‌کار توسط نرم افزار المان محدود آباکوس و نتایج حاصل از شبیه‌سازی با استفاده از روش

۳. معادلات الکترومغناطیسی

در روش کوپل ضعیف، معادلات حاکم بر الکترومغناطیس مسأله و معادلات حاکم بر قسمت سازه‌ای مسأله، مستقل از هم حل می‌شوند. اما در الگوریتم کوپل ترتیبی، شبیه‌سازی الکترومغناطیسی و شبیه‌سازی سازه‌ای، به‌طور متناوب انجام و تغییر هندسهٔ قطعه‌کار تابع زمان در حل معادلات حاکم بر قسمت الکترومغناطیس مسأله لحاظ می‌شود.

روش استفاده‌شده در این تحقیق بدین صورت است که کد معادلات ارائه‌شده به زبان فورترن نوشته شد و سپس در قالب زیر برنامه قرار گرفت تا محاسبات الکترومغناطیسی را انجام داده و فشار الکترومغناطیسی اعمالی بر لوله را محاسبه کند. فشار الکترومغناطیسی فعال بر روی لوله در هر لحظهٔ زمانی و در قسمت مکانیکی اعمال شده و تغییر شکل قطعه را سبب می‌شود؛ سپس محاسبات الکترومغناطیسی جدیدی بعد از بروزرسانی هندسهٔ لوله انجام می‌شود که در هر گام زمانی انجام می‌شود. شکل (۵) الگوریتم استفاده شده را نشان می‌دهد.



شکل ۵: الگوریتم استفاده شده برای شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی الکترومغناطیس

۵. شبیه‌سازی المان محدود

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

بر طبق معادلات شبه‌سکون ماکسول برای یک سیستم مختصات استوانه‌ای، چگالی میدان مغناطیسی B ، دارای ۲ مؤلفهٔ شعاعی B_r و محوری B_z است که به‌صورت زیر به‌دست می‌آیند [۹]:

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

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

در روابط بالا μ_0 نفوذپذیری فضای خالی و σ_w قابلیت هدایت الکتریکی قطعه و t زمان را نشان می‌دهد.

با فرض تقارن محوری، جریان گردابی، فقط یک مؤلفهٔ پیرامونی دارد، که به‌صورت زیر تعیین می‌شود [۹]:

$$J_\theta = \frac{1}{\mu_0} \left(\frac{\partial B_r}{\partial z} - \frac{\partial B_z}{\partial r} \right) \quad (3)$$

نیروی لورنتس دارای مؤلفه‌های شعاعی و محوری می‌باشد، که عبارتند از:

$$f_r = j_\theta B_z \quad (4)$$

$$f_z = -j_\theta B_r \quad (5)$$

مؤلفه‌های شعاعی و محوری فشار الکترومغناطیس با عمل انتگرال‌گیری به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$P_r = \int_{z=0}^{z=h_w} f_r dr \quad (6)$$

$$P_z = \int_{z=0}^{z=h_w} f_z dr \quad (7)$$

که در روابط بالا h_w ضخامت دیواره لوله است.

۴. الگوریتم شبیه‌سازی

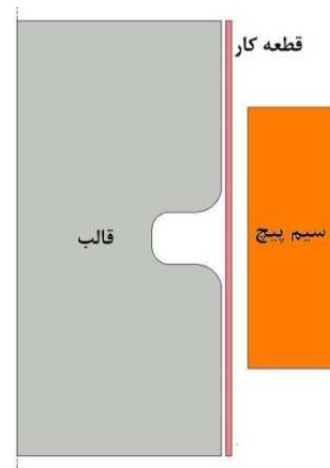
در شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی الکترومغناطیسی، بین نیروی الکترومغناطیس و شکل قطعه‌کار در حین فرایند شکل‌دهی، تعامل وجود دارد، یعنی بین قسمت الکترومغناطیس و قسمت سازه، کوپل وجود دارد.

الگوریتم‌های کوپل ضعیف^{۱۰} و کوپل ترتیبی^{۱۱} برای شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی الکترومغناطیسی استفاده می‌شوند [۱۰-۱۳].

لوله به صورت ماده شکل پذیر همگن و همسان گرد و مدل ماده در این شبیه سازی به علت بالابودن سرعت شکل دهی، مدل ویسکوپلاست جانسون کوک در نظر گرفته شد. این معادله به صورت زیر است [۱۵]:

$$\bar{\sigma} = [A + B\bar{\epsilon}^n] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\dot{\bar{\epsilon}}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (8)$$

در این معادله $\bar{\sigma}$ تنش جریان، A تنش جاری شدن، n توان کرنش سختی، C ضریب حساسیت به نرخ کرنش، $\dot{\bar{\epsilon}}$ نرخ کرنش پلاستیک لحظه ای و $\dot{\bar{\epsilon}}_0$ نرخ کرنش پلاستیک مرجع، T دمای قطعه کار، T_m دمای ذوب ماده، T_r دمای تبدیل (معمولاً دمای محیط)، m ضریب ماده که نرم شدن ماده در دماهای بالاست. این ثابت ها به همراه خواص فیزیکی و مکانیکی برای جنس آلومینیم بررسی شده و در جداول (۱) و (۲) آورده شده است.



شکل ۶: شماتیک قطعه کار، سیم پیچ و قالب به صورت تقارن محوری

به منظور اعمال فشار در شبیه سازی، از زیر برنامه استفاده شده است. فشار الکترومغناطیس به دست آمده از زیر برنامه، در نرم افزار آباکوس به صورت فشار مکانیکی بر روی مدل اعمال و تغییر شکل قطعه را منجر می شود. مطابق مرجع [۱۴] از افزایش حرارت به دلیل جریان القایی صرف نظر شده است. گام زمانی استفاده شده جهت پایدار بودن فرایند شبیه سازی $0.1 \mu s$ و کل فرایند شکل دهی الکترومغناطیس تحت بررسی [۳] $35 \mu s$ به طول می انجامد.

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

	n	m	C	B(MPa)	A(MPa)
۱	۰/۱۸۳	۰/۸۵۹	۰/۰۰۱	۳۴۵/۵۱۳	۱۴۸/۳۶۱

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

چگالی	استحکام تسلیم	استحکام نهایی	مدول الاستیسیته	ضریب پواسون	دمای ذوب
(Kg/m ³)	(MPa)	(MPa)	(GPa)		(°C)
۲۷۰۰	۱۴۸/۳۶۱	۳۴۵/۵۱۳	۶۵/۷۶۲	۰/۳	۶۲۰

لوله داخل شیار و درصد نازک شدگی داشته به همین دلیل در این تحقیق اثر این عوامل بررسی می شود. به منظور مشخص کردن حداکثر مقدار نازک شدگی در دیواره لوله از رابطه (۹) استفاده می شود.

برای شبکه بندی لوله از المان سیمی متقارن محوری SAX1 استفاده شده است. جهت مدل کردن اصطکاک بین قالب و لوله از مدل کلمب استفاده شده و این ضریب برابر 0.15 فرض شده است.

۶. طراحی آزمایش

عوامل مختلفی می توانند بر روی استحکام نهایی قطعات مونتاژ شده حاصل از فرایند الکترومغناطیسی، موثر باشند. انرژی تخلیه و عرض و شعاع شیار، نقش مهمی بر روی جابه جایی شعاعی دیواره

(۹)

t_0 ضخامت اولیه دیواره لوله و t_f ضخامت نهایی دیواره لوله

جدول ۳: پارامترهای مورد بررسی به همراه سطوح آنها

پارامتر	سطح پایین	سطح میانی	سطح بالا
انرژی تخلیه (کیلو ژول) (A)	۲/۴	-	۳/۶
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 ۱۸ آزمایش ممکن

برای طرح موجود وجود دارد.

جدول ۴: ماتریس آزمایش به همراه نتایج شبیه سازی

شماره آزمایش	انرژی تخلیه [Kj]	عرض شیار [mm]	شعاع شیار [mm]	جابجایی شعاعی [mm]	نازک شدگی [%]
۱	۲/۴	۳	۳	۲/۰۷۷	۲/۵۸۳
۲	۲/۴	۳	۴/۵	۲/۶۰۹	۲/۶۳۳
۳	۲/۴	۳	۶	۲/۸۷۷	۱/۹۵۰
۴	۲/۴	۶	۳	۲/۷۱۴	۲/۸۵۰
۵	۲/۴	۶	۴/۵	۲/۸۹۳	۲/۱۱۶
۶	۲/۴	۶	۶	۲/۹۴۸	۰/۷۵
۷	۲/۴	۹	۳	۲/۹۰۵	۲/۱۱۶
۸	۲/۴	۹	۴/۵	۲/۹۴۹	۰/۶۵
۹	۲/۴	۹	۶	۲/۹۶۳	۰/۱۳۳
۱۰	۳/۶	۳	۳	۲/۶۱	۳/۴۱۶
۱۱	۳/۶	۳	۴/۵	۳/۲۴۷	۳/۸
۱۲	۳/۶	۳	۶	۳/۷۶۸	۳/۲۵
۱۳	۳/۶	۶	۳	۳/۵۲	۴/۵
۱۴	۳/۶	۶	۴/۵	۳/۹۰۶	۳/۶۸۳
۱۵	۳/۶	۶	۶	۴/۰۶۶	۲/۱۱۶
۱۶	۳/۶	۹	۳	۳/۹۵۵	۳/۷۱۶
۱۷	۳/۶	۹	۴/۵	۴/۰۸۲	۲/۰۸۳
۱۸	۳/۶	۹	۶	۴/۱۲۳	۰/۵۵

دیواره لوله در لبه شیار می شود و شعاع بزرگتر نیز موجب می گردد که لوله به راحتی از روی ماندرل در هنگام تست کشش جدا شود. شعاع شیار می بایستی طوری مشخص شود که از کاهش ضخامت و جدا شدن اتصال جلوگیری شود. این بدین معنی است که شعاع شیار بهینه وابسته به ضخامت لوله است.

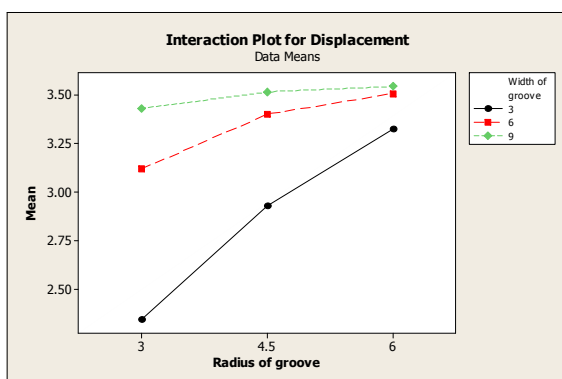
۷. نتایج و بحث

بیشترین نازک شدگی در ناحیه تماس با شعاع شیار، به دلیل تنش های کششی رخ می دهد. (شکل ۷)

شعاع شیار کوچکتر موجب تمرکز تنش و ایجاد برش در

بر روی ورق شده و در نتیجه جابه‌جایی شعاعی افزایش می‌یابد. اما همان‌طور که در شکل (۹) مشاهده می‌گردد، با افزایش عرض شیار، اثر شعاع شیار خیلی کمتر یا بی‌اثر می‌شود. به بیان دیگر اثر عرض شیار خیلی بیشتر از شعاع شیار است.

افزایش عرض شیار، سطح تماس بیشتری در ته شیار به وجود 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 به دلیل افزایش وزن محصول و هزینه مواد از لحاظ اقتصادی نیز مقرون به صرفه نیست.



شکل ۹: اثرات متقابل پارامترها بر روی جابه‌جایی شعاعی

۸. نتیجه‌گیری

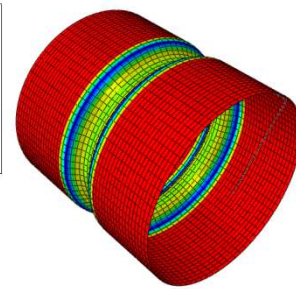
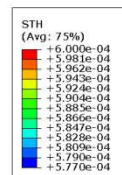
بررسی فرایند اتصال شکلی لوله‌های آلومینیومی به وسیله شکل‌دهی الکترومغناطیسی که یک رویکرد مناسب برای تولید ساختار سبک اتومبیل است، توسط نرم‌افزار المان محدود انجام شد و نتایج زیر حاصل گردید:

۱. با افزایش انرژی تخلیه، چگالی میدان مغناطیسی و فشار مغناطیسی افزایش یافته که منجر به افزایش جابه‌جایی شعاعی می‌گردد. با ثابت بودن عمق شیار، افزایش انرژی منجر به پرسیدن بیشتر شیار و در نتیجه استحکام بالاتر اتصال می‌گردد.

۲. ایجاد برش جزئی لوله در لبه شیار با بهینه‌نمودن شعاع شیار، موجب ایجاد مکانیزم قفلی و افزایش استحکام اتصال می‌گردد.

۳. وجود تنش‌های تداخلی در سطح مشترک لوله و ماندل، موجب تقویت اتصال شده و پیشنهاد می‌گردد برای افزایش اتصال تداخلی، سطوح آج‌زنی گردد.

۹. فهرست علائم

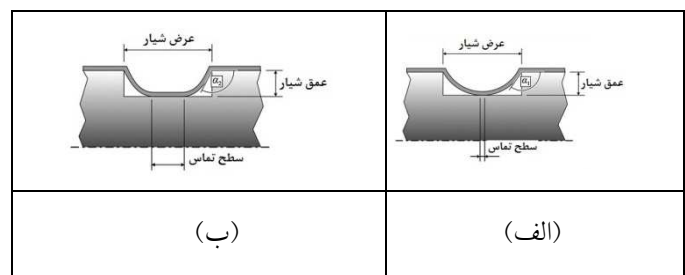


شکل ۷: توزیع ضخامت در راستای طول لوله

۷.۱. اثر انرژی تخلیه:

افزایش انرژی تخلیه، منجر به افزایش چگالی میدان مغناطیسی و فشار مغناطیسی شده و در نتیجه باعث افزایش فروروی دیواره لوله به داخل شیار می‌گردد که موافق با مرجع [۳] است.

افزایش در انرژی تخلیه شده باعث می‌شود که شیار، بیشتر از شرایط مشخص شده پر شود. همان‌طوری که در شکل (۸) نشان داده شده، با افزایش انرژی تخلیه شده، سطح بیشتر لوله با ته شیار در تماس قرار می‌گیرد. در طول فرایند شکل‌دهی اتصال تداخلی به همراه اتصال شکلی بین لوله و ماندل رخ می‌دهد. تغییر شکل پلاستیک لوله، یک تغییر شکل الاستیک کوچک بر روی ماندل ایجاد می‌کند. در نتیجه تنش تداخلی در صفحه تماس بین لوله و ماندل 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) اتصال ساخته شده با کمترین انرژی تخلیه برای پر کردن شیار

(ب) اتصال ساخته شده با انرژی تخلیه بالاتر

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

۷.۲. اثر عرض و شعاع شیار:

افزایش عرض و شعاع شیار منجر به افزایش گشتاور خمشی

علائم	شرح	نمود پذیرای فضای خالی
B_r	مؤلفه شعاعی چگالی میدان مغناطیسی	قابلیت هدایت الکتریکی قطعه
B_z	مؤلفه محوری چگالی میدان مغناطیسی	مؤلفه‌ی پیرامونی جریان گردابی
	مؤلفه شعاعی نیروی لورنتس	۹. واژه‌نامه
	مؤلفه محوری نیروی لورنتس	1. Electro-Magnetic Forming (EMF)
	ضخامت دیواره لوله	2. Lorentz
h_w		3. Interference fit
	زمان	4. Form fit
t		5. Bühler
	ضخامت اولیه دیواره لوله	6. Golovashchenko
	ضخامت نهایی دیواره لوله	7. Park
	مؤلفه شعاعی فشار الکترومغناطیس	8. Minitab
	مؤلفه محوری فشار الکترومغناطیس	9. Permeability
		10. Loose-coupled
		11. Sequential-coupled

۱۰. منابع

- [۱]. قربانی، ب، ۱۳۹۲. "بررسی پارامترهای فرایند شکل‌دهی الکترومغناطیسی برای ساخت ظروف فلزی به روش تکنیک المان محدود"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۹۲.
- [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, 383-390: 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, 142:744-754, 2003.
- [5] Weddeling, C., Woodward, S., Nellesen, J., Psyk, V., Marré, M., Brosius, A., Tekkaya, A.E., Daehn, G.S., Tillmann, W. 2010. "Development of design principles for form-fit joints in lightweight frame structures", 4th International Conference on High Speed Forming, 2010.
- [6] Wouterghem, M.V., Vanhulsel, P. "Magnetic pulse crimping of mechanical joints", MSc. thesis, Gent University, Belgium, 2011.
- [7] Eddeling, C., Woodward, S.T., Marré, M., Nellesen, J., Psyk, V., A. Erman Tekkaya, Wolfgang Tillmann. "Influence of groove characteristics on strength of form-fit joints", Journal of Materials Processing Technology, 211:925-935, 2011.
- [8] Park, Y.B., Kim, H.Y., Oh, S.I. Design of axial/torque joint made by electromagnetic forming. Thin-Walled Structures, 43: 826-844, 2005.
- [9] Siddiqui, M.A. "Numerical Modeling and simulation of electromagnetic Forming process". Ph.D. 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, 2 (1):693-696, 2009.
- [11] Pérez, I., Aranguren, I., González, B. and Eguía, I. "Electromagnetic forming: A new coupling method". Int J Mater Form, 2 (1):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, 209:707-713, 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, 20:315-25, 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, 32:1921-1944, 2006.
- [17] Montgomery, D.C, Design and Analysis of Experiments.5th Edition, John Wiley & Sons Inc, New York, 2001.

