نقش ابزار الاستومری در فرایندهای شکل‌دهی فلزات

حسن غفوریان نصرتی[1]، خلیل خلیلی[2]، محمد خوران[3]

۱ دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، h.ghafuriannosrati@birjand.ac.ir

۲ استاد دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

۳ عضو هیئت علمی مجتمع آموزش عالی اسفراین و دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۴/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۱/۱۲

چکیده

شناخت هرچه دقیق‌تر شکل‌دهی فلزات به‌عنوان یکی از روش‌های مهم ساخت و تولید قطعات صنعتی امری ضروری است. شکل‌دهی با قالب انعطاف‌پذیر از جمله فرایندهای شکل‌دهی فلزات است که به‌تازگی مورد استقبال پژوهشگران و صنعتگران قرار گرفته است. برخلاف فرایندهای متداول شکل‌دهی، در شکل‌دهی با قالب انعطاف‌پذیر از یک واسط انعطاف‌پذیر به‌جای سنبه (یا ماتریس) صلب، به‌عنوان انتقال‌دهندهٔ فشار، استفاده می‌شود. این واسط می‌تواند مایع، گاز و جامد (مواد ویسکوپلاستیک یا بالشتک و میلهٔ الاستومری) باشد. از شکل‌دهی با ابزار الاستومری به‌عنوان یکی از مهم‌ترین روش‌های شکل‌دهی با قالب انعطاف‌پذیر یاد می‌شود. با استفاده از ابزار الاستومری تنها به ساخت یک نیمهٔ صلب ابزار نیاز است و به‌همین دلیل هزینهٔ ساخت قالب به‌مراتب کاهش می‌یابد. انعطاف‌پذیری بالا در تولید قطعات پیچیده و کیفیت سطح مطلوب قطعه به‌دلیل تماس کمتر ابزار صلب با قطعه (در برخی از موارد عدم تماس) از جمله مزایای این فرایند است که سبب پیشی‌گرفتن آن از دیگر روش‌های سنتی شده است. برمبنای دلائل فوق، محققان از شکل‌دهی با ابزار الاستومری به‌صورت مستقل و از تلفیق آن با فرایندهای دیگر برای بهبود قابلیت شکل‌پذیری و ارتقای بازده آنها استفاده می‌کنند. این مقاله به بررسی پیشرفت‌های این حوزه و استفاده از ابزار الاستومری در شکل‌دهی ورق‌ها و لوله‌های فلزی پرداخته و این پژوهش‌ها را تحلیل کرده است.

واژگان کلیدی

شکل‌دهی، الاستومر، شبیه‌سازی، پلی‌اورتان، ابزار انعطاف‌پذیر، لوله، ورق

۱. مقدمه

توانایی تغییر شکل دائمی فلزات از جمله ارزشمندترین خصوصیات آنها به‌شمار می‌آید. بی‌شک تولید ورق، تسمه، میلگرد، لوله، مقاطع ساختمانی و به‌طور کلی شکل‌دهی فلزات مدیون این قابلیت است. با توجه به اینکه شکل‌دهی فلزات یکی از روش‌های مهم ساخت

و تولید قطعات است، شناخت هرچه دقیق‌تر این صنعت ضروری به‌نظر می‌رسد. به‌طور کلی فرایندهای شکل‌دهی فلزات را می‌توان به دو گروه عمده دسته‌بندی کرد [۱]:

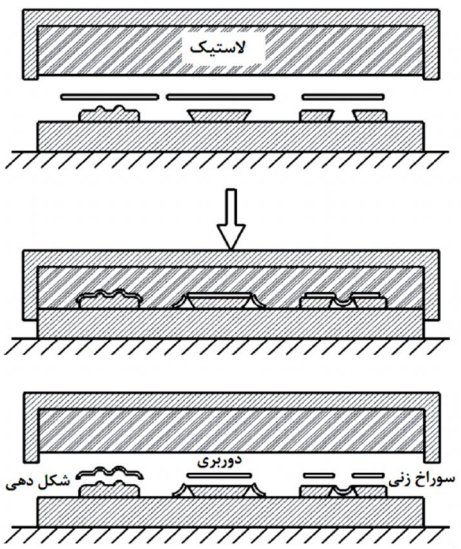
۱. شکل‌دهی حجمی[۱]
۲. شکل‌دهی ورق[۲]

در شکل‌دهی حجمی شکل یا سطح مقطع قطعه‌کار، تغییر شکل مومسان[۳] دائمی و زیاد پیدا می‌کند و مقدار تغییر شکل مومسان در این فرایند نسبت به تغییر شکل کشسان[۴] به قدری زیاد است که از برگشت فنری قطعه بعد از تغییر شکل صرف‌نظر می‌شود. فرایندهای شکل‌دهی ورق معمولاً تغییر قابل توجهی در هندسه قطعه به‌وجود می‌آورد؛ اما مساحت سطح مقطع جسم، چندان تغییر نمی‌کند. اغلب تغییر شکل‌های مومسان و کشسان از یک مرتبه‌اند. بنابراین نمی‌توان از برگشت فنری[۵] چشم پوشید. فرایند شکل‌دهی با ابزار الاستومری از جمله فرایندهای شکل‌دهی ورق است [۱]. پیشرفت روزافزون فناوری و رقابت سبب شده است تا صنایع هوافضا و همچنین خودروسازی به سمت تولید وسائل نقلیهٔ سبکتر، با مصرف سوخت کمتر و سازه‌های مستحکم‌تر سوق داده شوند. به‌همین دلیل استفاده از مواد جدید و توسعهٔ فرایندهای پیشرفتهٔ تولید امری لازم و ضروری است.

از جمله روش‌هایی که به تازگی در این صنایع مورد توجه قرار گرفته شده است، فرایند شکل‌دهی با ابزار الاستومری[۶] است. از این روش به‌دلیل انعطاف‌پذیری بالا، کیفیت سطح مطلوب و هزینهٔ پایین ساخت قالب (به‌علت استفاده از یک نیمهٔ صلب ابزار) به‌عنوان جایگزین مناسبی برای روش‌های مرسوم شکل‌دهی یاد می‌شود. برخلاف فرایندهای متداول شکل‌دهی، در شکل‌دهی با قالب انعطاف‌پذیر[۷] از یک واسط انعطاف‌پذیر به‌جای سنبه (یا ماتریس) صلب به‌عنوان انتقال‌دهندهٔ فشار استفاده می‌شود. واسط انعطاف‌پذیر می‌تواند مایع (آب و روغن)، گاز (هوای تحت فشار) و جامد (مواد ویسکوپلاستیک و یا یک ابزار الاستومری) باشد. فرایندهای شکل‌دهی با قالب انعطاف‌پذیر در مقایسه با فرایندهای با قالب صلب دارای مزایای متعددی چون هزینهٔ کم، انعطاف‌پذیری بالا، کیفیت سطح خوب و دقت ابعادی است. البته هر فرایند انعطاف‌پذیر معایب خاص خود را دارد. هیدروفرمینگ و شکل‌دهی با ابزار الاستومری از شناخته‌شده‌ترین فرایندهای شکل‌دهی با قالب انعطاف‌پذیر می‌باشند. در ادامه فرایند شکل‌دهی با ابزار الاستومری معرفی می‌گردد [۲].

۱-۲. فرایند شکل‌دهی با ابزار الاستومری

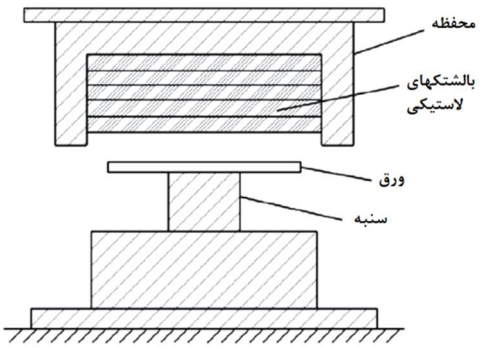
در این فرایند از یک بالشتک[۸] یا میلهٔ[۹] لاستیکی یا یک دیافراگم انعطاف‌پذیر به‌عنوان یک نیمهٔ قالب استفاده می‌شود و تنها به یک نیمهٔ صلب ابزار برای شکل‌دهی نیاز است. نیمهٔ صلب ابزار شکل‌دهی می‌تواند سنبه یا ماتریس باشد؛ همچنین جنس آن می‌تواند از چسب اپکسی[۱۰]، چوب سخت، آلیاژهای روی، آلومینیم، چدن و فولاد باشد. این ابزار الاستومری به‌منظور شکل‌دهی همانند سیال هیدرولیک بر تمام سطح قطعه فشار تقریباً یکسانی وارد می‌کند. این فرایند برای شکل‌دادن قطعاتی که عمق فرورفتگی کم و فلنج‌های ساده دارند؛ مناسب است. عمق قطعه معمولاً کمتر از ۱۰۰ میلی‌متر (۳/۹ اینچ) است. پرس‌های هیدرولیک در اغلب فرایندهای شکل‌دهی انعطاف‌پذیر مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱]. برخی از روش‌های شکل‌دهی با ابزار انعطاف‌پذیر می‌تواند برای تولید انبوه قطعاتی چون منعکس‌کنندهٔ نور چراغ عقب خودرو و کشش عمیق پوسته‌های توستر استفاده شود. در شکل ۱ کاربردهای متنوع شکل‌دهی با ابزار الاستومری به‌صورت شماتیک نمایش داده شده است.



شکل ۱. کاربردهای متنوع فرایند شکل‌دهی با ابزار الاستومری [۲]

در گذشته روش‌های شکل‌دهی با ابزار الاستومری توسط فرایندهای خاص زیر تعیین می‌گردید. فرایند گوارین[۱۱]، فرایند ورسون - ویلون[۱۲]، فرایند شکل‌دهی به‌وسیلهٔ الاستومر با استفاده از چکش[۱۳]، فرایند مارفورم[۱۴]، فرایند ماسلنیکو[۱۵] و فرایند دیمارست[۱۶]. برای اطلاعات بیشتر در این زمینه می‌توان به مرجع [۳] مراجعه کرد. به‌عنوان مثال فرایند گوارین اصلی‌ترین و قدیمی‌ترین نوع از

فرایندهای شکل‌دهی با ابزار الاستومری است که معمولاً اندازهٔ بالشتک الاستومری سه برابر عمق قطعهٔ شکل داده شده است. بالشتک می‌تواند یکپارچه یا به‌صورت تکه‌هایی که روی هم به‌صورت ورقه‌ورقه چسبانده شده‌اند باشد و در یک محفظهٔ نگه داشته شود (شکل ۲).



شکل ۲. نمایی شماتیک از فرایند گوارین [۲]

محفظهٔ نگهدارندهٔ الاستومر روی رم بالایی پرس ثابت می‌شود و صفحهٔ فلزی شامل سنبه روی صفحهٔ پایینی پرس قرار می‌گیرد. یک ورق روی سنبه قرار می‌گیرد و توسط دو یا چند پین موقعیت‌دهنده در جای خود نگه داشته می‌شود. این پین‌ها باید به‌صورت صلب طراحی شوند تا الاستومر باعث حرکت آن نشود؛ همچنین نباید باعث سوراخ‌شدن بالشتک الاستومری شود. با پایین‌آمدن رم پرس، الاستومر ورق را روی سنبه فشار می‌دهد و قطعه‌کار شکل می‌گیرد. فشار تابعی از تعداد قطعه‌های شکل داده شده نیست، اما تابعی از مساحت صفحه فلزی نگه‌دارندهٔ سنبه است. بنابراین تعدادی سنبه ممکن است روی یک صفحهٔ فلزی نصب شود. اگر تغییر شکل در آن کمی دشوار باشد، باید از ابزارهای کمکی به‌منظور جلوگیری از چین‌خوردگی استفاده کرد. شکل ۳ نشان‌دهندهٔ ابزارهای کمکی مورد استفاده در فرایند شکل‌دهی با ابزار الاستومری است. از مهمترین مزایای فرایندهای شکل‌دهی با ابزار الاستومری در مقایسه با فرایندهای شکل‌دهی سنتی می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد:

۱. برای شکل‌دادن قطعه تنها به یک نیمه از ابزار صلب نیاز است
۲. یک بالشتک الاستومری یا یک دیافراگم برای شکل‌دهی انواع مختلف قطعه استفاده می‌شود، بالشتک یا میله الاستومری با برداشتن فشار از روی آن به حالت اولیه خود برمی‌گردد
۳. در طی پیشرفت فرایند، شعاع شکل‌دهی به‌طور پیشرونده‌ای کاهش می‌یابد، در صورتی که در شکل‌دهی سنتی این شعاع ثابت است
۴. نازک‌شدن موضعی قطعه‌کار که در کشش عمیق به روش سنتی اتفاق می‌افتد، در این فرایند به‌طور قابل توجه‌ای کاهش می‌یابد
۵. قطعات با ضخامت‌های مختلف با یک ابزار می‌توانند شکل‌دهی شود
۶. قطعات با کیفیت سطح بالایی می‌توانند شکل‌دهی شود و از خراشیدگی سطح قطعه خوداری می‌شود. این امر خصوصاً در شکل‌دهی قطعات روکش‌دار اهمیت دارد

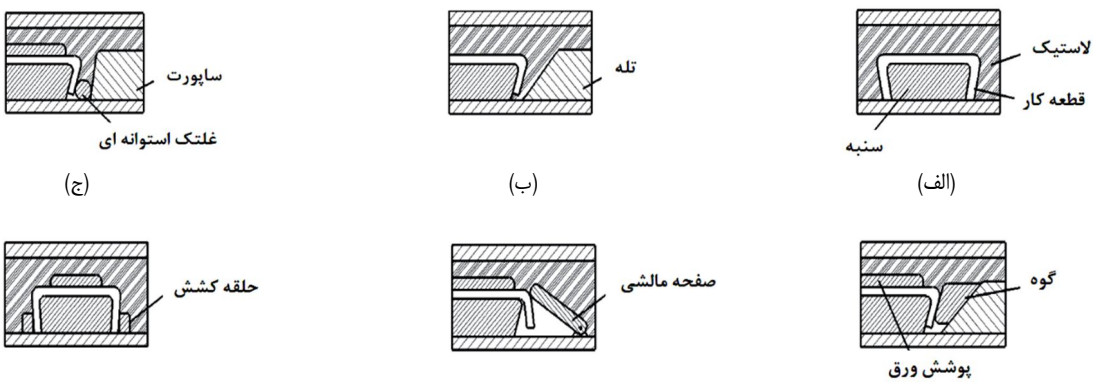
از طرفی، محدودیت‌های فرایندهای شکل‌دهی با ابزار الاستومری عبارت است از:

۱. مدت که می‌توان از ابزار الاستومری استفاده کرد محدود است و به سختی آن و فشار شکل‌دهی بستگی دارد
۲. فشار شکل‌دهی کم باعث می‌شود که گوشه‌های تیز کاملاً شکل پیدا نکند و ممکن است که به عملیات ثانویه نیاز داشته باشد
۳. نرخ تولید نسبتاً آرام است، در نتیجه فرایند برای نمونه‌سازی اولیه مناسب می‌باشد

۱-۳. الاستومر و انواع آن

در این بخش مقدمه‌ای کوتاه در مورد خواص مواد الاستومری و همچنین الاستومرهای مناسب برای فرایند شکل‌دهی بیان می‌شود. نزدیک به ۱۵۰ سال است که الاستومرها (یا مواد لاستیکی) به‌عنوان مواد مهندسی استفاده می‌شوند. خاصیت مهم الاستومرها رفتار الاستیکی آنها بعد از تغییرشکل در مقابل فشار یا کشش است. برای مثال ممکن است یک الاستومر ۱۰ برابر طول اولیهٔ خود کشیده شود، اما بعد از حذف کشش، تحت شرایط محیطی ایده‌آل، به شکل و طول اولیهٔ خود بازگردد. علاوه بر این، الاستومرها با ویژگی‌هایی نظیر استحکام و سفتی بالا تحت تنش‌های دینامیکی یا استاتیکی، مقاومت بسیار خوب در برابر سایش که تنها فولادها بالاتر از آن قرار می‌گیرد، نفوذناپذیری در مقابل هوا و آب و در بعضی از موارد مقاومت بالا در برابر تورم در حلال‌ها و مقاوم‌بودن در برابر مواد شیمیایی مشخص می‌شوند [۴]. الاستومرهای مورد استفاده در فرایندهای شکل‌دهی با

بالشتک کشسان [۲] عبارت‌اند از لاستیک طبیعی[۱۷]، لاستیک استایرن - بوتادین[۱۸]، لاستیک سیلیکون[۱۹] و پلی‌اورتان[۲۰]. بزرگترین بزرگترین کاربرد لاستیک طبیعی در لاستیک خودرو است. لاستیک استایرن - بوتادین لاستیک مصنوعی کوپلیمر ساخته‌شده از ترکیب استایرن و بوتادین است. معمولاً به‌دلیل مقاومت خوب در برابر سایش به‌هنگام ساخت لاستیک خودرو با لاستیک طبیعی مخلوط می‌شود. لاستیک سیلیکون برای قالب‌گیری تزریق مناسب است. خواص لاستیک سیلیکون در دماهای بالا عالی است و دارای طیف گسترده‌ای از سختی ۱۰ تا ۸۰ شور است و بهترین گزینه برای استفاده در صنایع غذایی است. پلی‌اورتان همچنین به‌عنوان پلی‌کربنات‌ها شناخته می‌شود و یا به بیان ساده‌تر پلی‌اورتان‌ها پلیمرهایی خطی‌اند که شامل گروه‌های کاربامات[۲۱] (-NHC02) می‌باشند. مزایای بسیاری برای پلی‌اورتان وجود دارد؛ مقاومت به سایش بالای آن، که در چرخ‌های زیر میز و صندلی استفاده می‌شوند. همچنین ظرفیت تحمل بار بالا در مقایسه با سایر لاستیک‌ها سبب شده تا به‌طور گسترده‌ای در فرایند شکل‌دهی با بالشتک کشسان استفاده شود. به‌طور کلی محدودهٔ دمای سودمند پلی‌اورتان ۳۰ تا ۷۰ درجهٔ سانتی‌گراد است. اگرچه برای کاربردهای خاص از پلی‌اورتان‌های مقاوم در دمای بالا (۷۰ تا ۲۶۰ درجه سانتی‌گراد) استفاده می‌شود [۲]. در این مقاله پیشرفت‌های این حوزه و استفاده از ابزار الاستومری در شکل‌دهی ورق‌ها و لوله‌ها بررسی شده است.



شکل ۳. استفاده از ابزار کمکی در فرایند شکل‌دهی با ابزار الاستومری [۲]؛ الف) شکل‌دهی با لاستیک معمول، ب) افزایش فشار لاستیک با استفاده از تله یا مانع، ج) استفاده از غلتک استوانه‌ای، د) استفاده از گوه، ه) استفاده از صفحهٔ لولایی مالشی، و) استفاده از حلقهٔ کشش

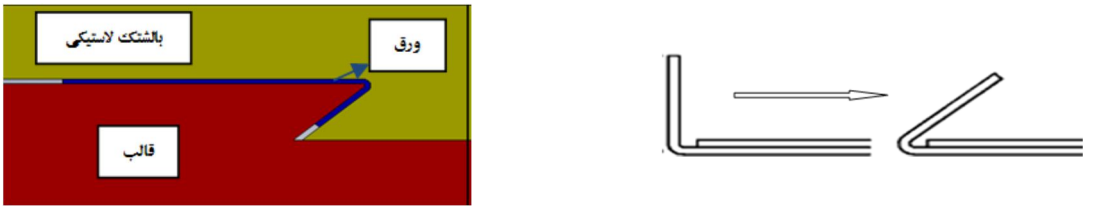
۲. پیشینهٔ پژوهش

در سال‌های اخیر فعالیت‌های پژوهشی قابل توجهی پیرامون فرایندهای شکل‌دهی با ابزار الاستومری با هدف دستیابی به یک قطعه بدون نقص صورت گرفته است. پژوهش‌های محققان را به دو قسمت شکل‌دهی ورق و شکل‌دهی لوله تقسیم‌بندی و به‌طور مجزا شرح داده می‌شود.

۲-۱. شکل‌دهی ورق با ابزار الاستومری

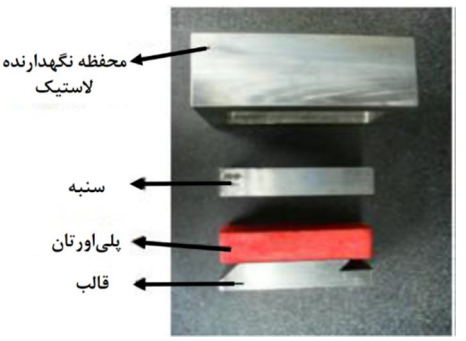
تاثیر طول خم‌کاری و شعاع قالب بر برگشت فنری در خم‌کاری ۱۳۵ درجه با استفاده از ابزار الاستومری توسط باقری و همکاران (۱۳۹۰) مورد بررسی قرار گرفت [۵]. این نوع خم‌کاری در مرحلهٔ اول فرایند همینگ[۲۲] (لبه‌دار کردن) مورد استفاده قرار می‌گیرد. از این فرایند بیشتر در صنعت خودرو استفاده می‌شود. در روش سنتی برای خم‌کاری ۱۳۵ درجه نیاز به دو مرحله (خم ۹۰ درجه و سپس خم ۴۵ درجه) خم‌کاری می‌باشد (شکل ۴ الف). که با استفاده از بالشتک الاستومری از جنس پلی‌اورتان با سختی ۷۰ شور A[۲۳] می‌توان در یک مرحله خم‌کاری را انجام داد (شکل ۴ ب).

در این پژوهش از ورق فولادی اس. تی. ۱۴ با ضخامت ۰/۶ میلی‌متر جهت انجام فرایند خم‌کاری استفاده شد، همچنین بررسی تأثیر پارامترهای شعاع قالب و طول خم‌کاری بر برگشت فنری صورت گرفت. با توجه به نتایج، تأثیر شعاع قالب بر برگشت فنری نسبت به طول خم‌کاری بیشتر بوده است. افزایش شعاع قالب باعث افزایش برگشت فنری می‌شود؛ در حالی‌که پارامتر طول خم‌کاری تأثیر معکوس دارد و با کاهش طول خم‌کاری برگشت فنری افزایش ناچیزی پیدا می‌کند. مجموعه قالب استفاده‌شده در این پژوهش در شکل ۵ قابل مشاهده است.



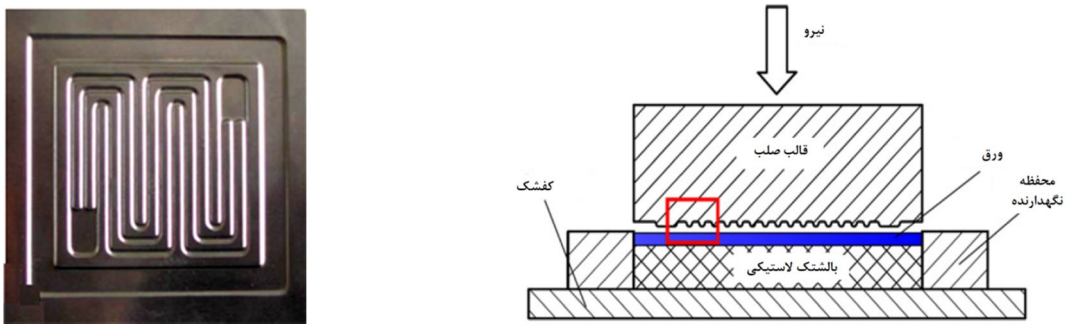
(ب) (الف)

شکل ۴. مراحل خم‌کاری ۱۳۵ درجه؛ الف) روش سنتی، ب) با استفاده از ابزار الاستومری [۵]



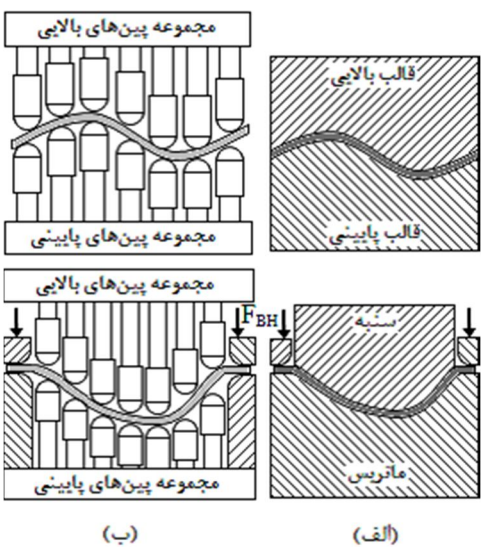
شکل ۵. مجموعهٔ قالب خم‌کاری [۵]

مدل رایانه‌ای فرایند شکل‌دهی ورق با ابزار الاستومری به‌منظور بررسی اثر پارامترهای سختی بالشتک، جنس ورق و شرایط اصطکاکی؛ توسط دیریکلو (۲۰۰۴) ارائه شد [۶]. این بررسی با استفاده از نرم‌افزار المان محدود انسیس[۲۴] انجام شد. در این پژوهش از دو بالشتک الاستومری با سختی‌های متفاوت و ورق‌های فولادی و آلومینیمی استفاده شد. نتایج نشان داد که یک بالشتک پلی‌اورتان می‌تواند برای شکل‌دهی با ابزار الاستومری استفاده شود. همچنین تغییر در سختی بالشتک سبب تغییر در مقدار تنش‌های شکل‌دهی ورق نمی‌شود و روند توزیع تنش برای ورق با مواد مختلف به‌صورت مشابه است. دو مدل اصطکاکی برای رفتار واقعی فرایند شکل‌دهی متقارن محوری ورق با بالشتک الاستومری؛ بنا بر نظریهٔ ایستایی و مدل اصطکاک جنبشی توسط رمضانی (۲۰۰۹) ارائه شد [۷]. از مهمترین مشکلات مربوط به مدلسازی این فرایند نیروی اصطکاک بین ورق و ابزارهای شکل‌دهی می‌باشد که نقش مهمی بر عملکرد فرایند و خواص نهایی قطعه دارد. هر دو مدل براساس شرایط موضعی تماس ارائه گردید. نتایج نشان داد که مدل اصطکاکی ارائه‌شده در مقایسه با مدل اصطکاک کولمبی ارتباط بهتری با نتایج تجربی داشته است. از فرایند شکل‌دهی با ابزار الاستومری برای تولید صفحهٔ فلزی پوستهٔ قابل تعویض محفظهٔ سوخت با چند کانال جریان کوچک توسط لین هوآ[۲۵] و همکاران (۲۰۱۰) استفاده شد [۸]. این نتایج بیان می‌کند که فرایند شکل‌دهی با بالشتک ابزار الاستومری تکنیکی عملی برای ساخت صفحات محفظهٔ سوخت می‌باشد (شکل ۶). در همان سال، شبیه‌سازی المان محدود و تجربی فرایند شکل‌دهی با ابزار الاستومری با استفاده از سه نوع لاستیک طبیعی، مصنوعی و پلی‌اورتان به‌عنوان سنبهٔ انعطاف‌پذیر، با هدف بررسی اثر سرعت سنبه و جنس الاستومر روی نیروی فرایند؛ توسط رمضانی (۲۰۱۰) بررسی شد [۹]. از مهمترین نتایج به‌دست آمده از این تحقیق آن است که پلی‌اورتان مناسب‌ترین نوع الاستومر برای فرایند شکل‌دهی با ابزار الاستومری می‌باشد؛ همچنین مجموعهٔ قالب به‌همراه ورق‌های شکل داده شده در شکل ۷ آورده شده است. فرایند شکل‌دهی چندنقطه‌ای، یک روش شکل‌دهی انعطاف‌پذیر جهت تولید انواع قطعات از ورق‌های فلزی است. ایدهٔ اصلی این فرایند، مبتنی بر تقسیم سطوح صلب منحنی‌وار موجود در قالب‌های متداول به مجموعه‌هایی از المان‌های گسسته کنار هم است. شکل ۸ فرایندهای شکل‌دهی سنتی و فرایند شکل‌دهی چندنقطه‌ای را بدون استفاده و با استفاده از ورق‌گیر نشان می‌دهد. بررسی تجربی و عددی شکل‌دهی ورق‌های فلزی با استفاده از فرایند شکل‌دهی چندنقطه‌ای به‌کمک ابزار الاستومری توسط وفایی‌صفت و همکاران (۱۳۹۱) انجام شد [۱۰]. نای شماتیک این فرایند به‌همراه مجموعه قالب مورد استفاده در شکل ۹ قابل مشاهده است.



شکل ۶. شماتیک فرایند تولید صفحهٔ فلزی پوستهٔ قابل تعویض محفظهٔ سوخت پروتون با ابزار الاستومری به همراه صفحهٔ تولیدشده [۸]

شکل ۷. ورق‌های شکل داده شده به‌همراه مجموعهٔ قالب [۹]



شکل ۸. الف) فرایندهای شکل‌دهی سنتی، ب) فرایند شکل‌دهی چندنقطه‌ای (با استفاده و بدون استفاده از ورق‌گیر) [۱۰]

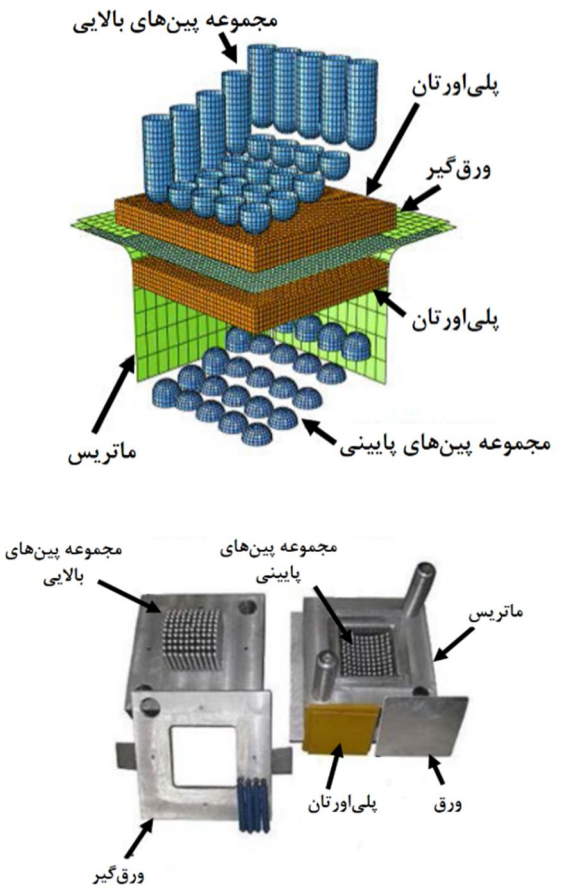
در این پژوهش روش شکل‌دهی چندنقطه‌ای به‌صورت تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود مطالعه شده است. با در نظر گرفتن کاربرد گسترده آلیاژ آلومینیمی AA2024 در صنایع هوافضا، ورق‌هایی از جنس این آلیاژ برای انجام آزمایشات مورد استفاده قرار گرفته است. در حین عملیات شکل‌دهی هر یک از المان‌ها یک نیروی متمرکز را به سطح ورق اعمال می‌کنند که منجر به موضعی شدن تغییر شکل در نقاط تماس المان‌ها با ورق می‌شود که این امر می‌تواند سبب ایجاد عیوب تورفتگی در سطح قطعه‌کار شود (شکل ۱۰). برای جلوگیری از ایجاد عیب تورفتگی از یک مادهٔ انعطاف‌پذیر مابین سطح ورق و سطح پین‌ها استفاده می‌شود. به‌منظور بررسی دقیق‌تر عیب تورفتگی، شکل‌دهی قطعه‌کار در دو حالت استفاده از لایهٔ الاستیک و عدم استفاده از لایهٔ الاستیک

به‌صورت تجربی و شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گرفته است. تأثیر پارامترهای فرایندی از جمله قطر پین و ضخامت لایهٔ الاستیک بر دقت ابعادی و توزیع ضخامت قطعات تولیدشده بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که فرایند فوق می‌تواند به‌عنوان روشی کارآمد و اقتصادی برای تولید انواع قطعات تکی موجود در زمینه‌های مختلف صنعتی به‌ویژه صنعت هوافضا مورد استفاده قرار گیرد، به‌طوری‌که با تنظیم مناسب پارامترهای فرایند امکان تولید قطعات با شکل‌های هندسی متنوع تنها با استفاده از یک قالب وجود خواهد داشت. مطالعهٔ عددی و تجربی روی پارامترهای مؤثر شکل‌دهی با استفاده از ابزار الاستومری در قطعاتی دارای شعاع انحنا از جنس آلومینیم توسط مهشیدی‌فر (۲۰۱۳) انجام شده است [۱۱]. پارامترهای مورد بررسی در این تحقیق شامل شعاع انحنا، ضخامت ورق، ضخامت و سختی بالشتک الاستومری و شرایط روانکاری است. نتایج بیان می‌کند که افزایش اصطکاک بین سنبه و ورق فلزی به خم شدن ورق کمک می‌کند؛ بنابراین با ایجاد شرایط مناسب برای اصطکاک بین سطح ورق و بالشتک، همچنین ورق و سنبه؛ کیفیت و شکل‌پذیری ورق افزایش می‌یابد. همچنین افزایش ضخامت بالشتک باعث کاهش اثر برگشت فنری می‌شود (شکل ۱۱).

لیزر فورمینگ دینامیکی یا پویا[۲۶] از جمله تکنیک‌های جدید شکل‌دهی با سرعت بالاست که در واقع موج شوک تولید شده توسط لیزر را برای بارگذاری نمونه به‌کار می‌گیرد. سرعت شکل‌دهی که ناشی از انرژی بالای پالس لیزر است ممکن است از سرعت شکل‌دهی بحرانی تجاوز کند و سبب وقوع شکست زودرس قطعه شود. به‌منظور جلوگیری از این مشکل وانگ[۲۷] و همکاران (۲۰۱۶) استفاده از یک لایهٔ الاستومری را در فرایند لیزر فورمینگ دینامیکی پیشنهاد کردند [۱۲]. برای مطالعهٔ اثر لایهٔ الاستومری آزمون انبساط‌دهی[۲۸] انجام شد (شکل ۱۲). نتایج نشان می‌دهد که انرژی ناشی از موج شوک در طول انتشار از طریق لایهٔ الاستومری کاهش می‌یابد و از شکستگی زودرس قطعه جلوگیری می‌کند؛ در نتیجه تغییر شکل پلاستیک می‌تواند ادامه پیدا کند و قابلیت شکل‌دهی فرایند بهبود خواهد یافت.

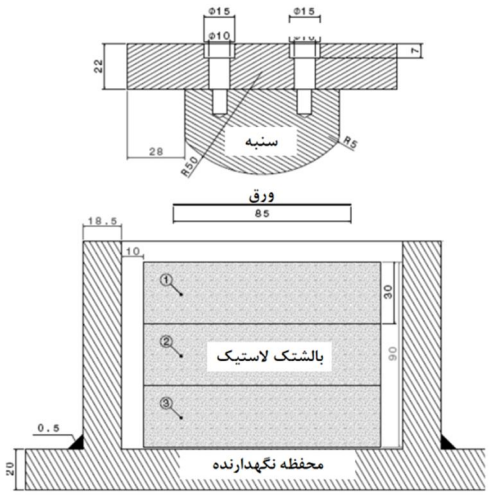
۲-۲. شکل‌دهی لوله با ابزار الاستومری

کلانتری و همکاران [۱۳-۱۴] به‌منظور بررسی اثر پارامترهای مختلف، ابتدا براساس نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده توسط نرم‌افزار آباکوس[۲۹] میزان تقریبی نیروی مورد نیاز جهت تغییر شکل لوله را محاسبه و پس از انجام آزمایش‌های تجربی و مقایسه‌ی نتایج آن با نتایج حاصل از شبیه‌سازی، صحت نتایج شبیه‌سازی آنها مورد تأیید قرار گرفته است. در این تحقیق از لولهٔ مسی آنیل‌شده برطبق استاندارد ASTM B280 با قطر خارجی ۲۲/۲۲ میلی‌متر و ضخامت ۱/۱۴ میلی‌متر استفاده شد (شکل ۱۳). میلهٔ الاستومری از جنس پلی‌اورتان، با طول ۱۰۰ میلی‌متر و قطر ۱۹/۵ میلی‌متر انتخاب گردید. بررسی اثر شعاع گوشهٔ قالب و ضخامت لوله، به‌کمک شبیه‌سازی نشان می‌دهد که افزایش شعاع قالب در افزایش طول شاخه مؤثر بوده و همچنین سبب کاهش میزان نازک‌شدگی سر شاخه می‌شود. در فرایند بالج فرمینگ لوله‌های تی. شکل، با افزایش ضخامت اولیهٔ لوله به نیروهای بزرگتری نیاز است. گفتنی است این افزایش ضخامت باعث تولید شاخه‌های بلندتری خواهند شد، اما میزان افزایش ضخامت آنها در انتهای لوله نیز بیشتر خواهد بود.

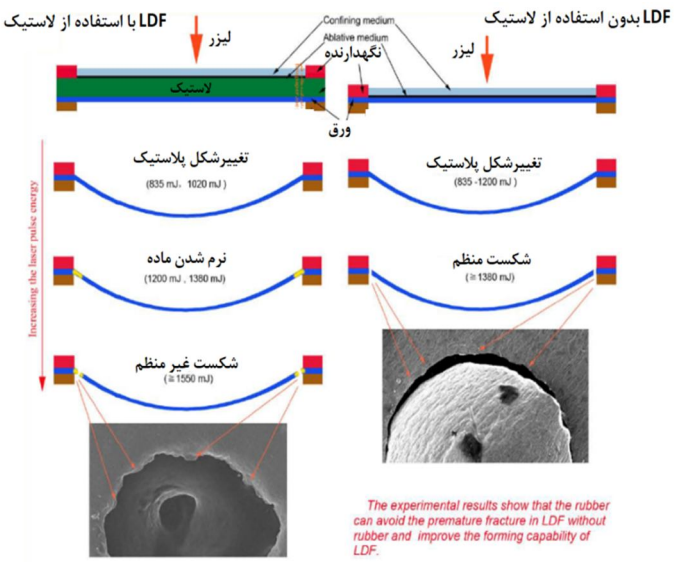


شکل ۹. مجموعهٔ قالب شکل‌دهی چندنقطه‌ای به‌کمک الاستومر و شماتیک فرایند [۱۰]

شکل ۱۰. عیب تورفتگی در قطعه بدون استفاده از لایهٔ الاستومری، و استفاده از لایهٔ الاستومری برای رفع این عیب [۱۰]



شکل ۱۱. شماتیک فرایند شکل‌دهی ورق دارای شعاع انحنا با ابزار الاستومری [۱۱]



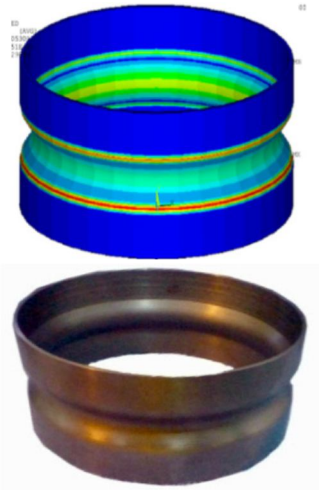
شکل ۱۲. شماتیک فرایند لیزر فرمینگ دینامیکی به‌کمک ابزار الاستومری [۱۲]

انقباض قطر موضعی لولهٔ فولادی اس. تی. ۳۷ توسط یک حلقهٔ کشسان به‌صورت عددی و تجربی توسط درویشی و همکاران (۱۳۸۹) بررسی شد [۱۵]. در این تحقیق، شبیه‌سازی فرایند توسط نرم‌افزار المان محدود انسیس اجرا و نتایج عددی با نتایج تجربی مقایسه شد. قطر داخلی لوله ۱۴۴/۹ میلی‌متر، ضخامت آن ۲ میلی‌متر و ارتفاع آن ۷۳/۴ میلی‌متر است که در

وسط طول آن کاهش قطری به اندازهٔ ۱۲ میلی‌متر ایجاد می‌شود. الاستومر مورد استفاده از جنس تایر تراکتور با سختی ۷۰ شور A می‌باشد. در ادامهٔ این تحقیق مونتاژ لوله‌های فولادی با کاهش قطر موضعی در حوزهٔ اتصال توسط حلقهٔ الاستومری بررسی شد. با توجه به نتایج استخراج شده از حل عددی، این روش را می‌توان به‌عنوان یک روش کاربردی در زمینهٔ مونتاژ لوله‌ها معرفی کرد (شکل ۱۴). این فرایند علاوه بر حفظ کیفیت سطوح، موجب ایجاد تغییرات متالورژیکی در ساختار لوله مثل فرایند جوشکاری نمی‌شود. از این روش می‌توان برای اتصال لوله‌هایی از جنس‌های مختلف که امکان اتصال آنها توسط سایر فرایندهای دیگر مقدور نیست، استفاده کرد.

شکل ۱۳. لوله‌های مسی تی. شکل تولیدشده با ابزار الاستومری [۱۳]

بسیاری از قطعات صنعتی مثل روکش اکسل، لوله‌های توخالی پله‌دار و جز این‌ها با فرایند انبساط‌دهی متقارن محوری لوله فلزی تولید می‌شوند. اغلب مطالعات تجربی فهم دشواری از فرایند را مخصوصاً در مورد چگونگی توزیع تنش و کرنش در قطعات شکل داده شده آشکار می‌کند. لذا شبیه‌سازی عددی متقارن محوری فرایند انبساط‌دهی لوله با استفاده از میلهٔ الاستومری از جنس پلی‌اورتان توسط مک‌دونالد[۳۰] و همکاران بررسی شد [۱۶]. در این تحقیق از یک میله پلی‌اورتان با سختی ۹۵ شور A و با قطر ۳۸ میلی‌متر برای بالج یک لوله آنیل شده مسی با قطر ۴۲ میلی‌متر و با ضخامت ۱/۲ میلی‌متر استفاده شده است (شکل ۱۵). شبیه‌سازی متقارن محوری المان محدود با نرم‌افزار LS-DYNA انجام و ارتباط خوبی بین داده‌های اندازه‌گیری شده تجربی و پیش‌بینی شده توسط شبیه‌سازی در مورد عمق بالج و توزیع ضخامت در قطعات تولید شده به‌دست آمده است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که توزیع تنش به‌دلیل اصطکاک بالا در ناحیهٔ تماس لوله و الاستومر؛ بسیار غیرمعقول است. این اصطکاک بالا سبب ایجاد چین در لوله تغییر شکل یافته می‌شود (شکل ۱۶). اصطکاک بین لوله و میله پلی‌اورتان در صورتی که تحت کنترل قرار گیرد می‌تواند سودمند باشد؛ به‌عنوان مثال لوله را بیشتر وارد ناحیهٔ تغییر شکل می‌کند. بنابراین از نازک‌شدن بیش از اندازهٔ لوله نیز جلوگیری می‌شود.



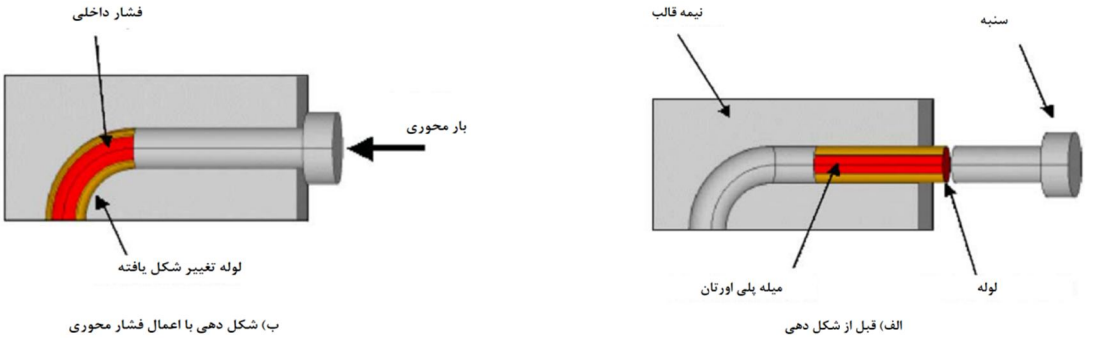
شکل ۱۴. مقایسهٔ کاهش قطر موضعی لولهٔ فولادی با نتایج عددی [۱۵]

شکل ۱۵. لولهٔ مسی شکل داده شده به‌همراه مجموعهٔ قالب [۱۶]

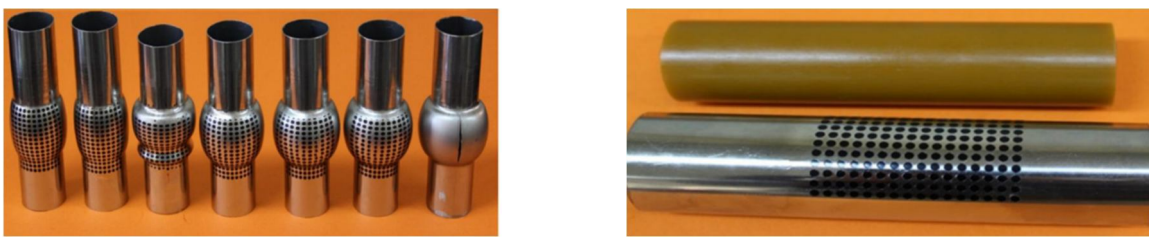
یک روش جدید به‌منظور خم‌کردن لوله توسط مک‌دونالد [۱۷] ارائه شد. در این روش یک لوله با استفاده از فشار داخلی

درون محفظه یک قالب صلب به شکل آرنج دست خم شده است. از محفظهٔ صلب قالب به‌منظور هدایت لوله به داخل ناحیهٔ خم و همچنین از یک سنبهٔ صلب جهت تأمین حرکت روبه جلو لوله استفاده شده است (شکل ۱۷). گفتنی است استفاده از فشار داخلی به‌جهت جلوگیری از ایجاد چین‌خوردگی و کمانش است. به‌منظور تأمین فشار داخلی از یک میلهٔ پلی‌اورتان استفاده شده است. شبیه‌سازی این روش خم جدید ارائه شده به‌دلیل سطح تماس زیاد و همچنین رفتار غیرخطی شدید پلی‌اورتان مورد استفاده بسیار دشوار و امری پیچیده است. لذا در این تحقیق به‌منظور دستیابی به این هدف از فرضیات ساده‌ساز فراوانی استفاده شده است؛ بدیهی است که برای داشتن نتایج معقول نسبت به آزمون تجربی باید تا حد امکان این ساده‌سازی‌ها کمتر شود. تحلیل عددی و تجربی فرایند انبساط‌دهی آزاد لولهٔ درزدار فولادی زنگ‌نزن ۳۰۴، با استفاده از ابزار الاستومری از جنس پلی‌اورتان توسط غفوریان و گردویی (۲۰۱۵) انجام شد. در این پژوهش شبیه‌سازی عددی به روش المان محدود از حلگر صریح نرم‌افزار آباکوس ۱۲-۶ برای مدلسازی سه‌بعدی فرایند استفاده و اثر شرایط اصطکاکی مختلف مورد بررسی قرار گرفت. به‌منظور تعریف رفتار میله الاستومری به‌صورت یک مادهٔ هایپرالاستیک تراکم‌ناپذیر از معادلهٔ رفتاری مونی - ریولین[31] استفاده شده است. لولهٔ فولادی با رفتار الاستیک - پلاستیک و معیار شکست نرم پیشرونده از نوع منحنی حد شکل‌دهی تحلیل شد. در بخش تجربی از این تحقیق، بعد از انجام آزمون فشار لاستیک براساس استاندارد ASTM D575-91 و تعیین ثوابت معادلهٔ رفتاری پلی‌اورتان؛ شکل‌دهی لوله در شرایط مختلف روانکاری تا رسیدن به آستانهٔ پارگی انجام گرفت. نتایج نشان داد سیستم روانکاری مورد استفاده (به‌ویژه بین لاستیک و لوله) نقش به‌سزایی در کنترل چروکیدگی، افزایش عمق بالج، کاهش نیروی شکل‌دهی و انرژی تلف‌شدهٔ اصطکاکی فرایند خواهد داشت. همچنین مشخص شد که قطعات سالم بدون چین‌خوردگی با استفاده از روانکار نایلون بین لاستیک و لوله و روانکار روغن کشش بین لوله و قالب شکل داده می‌شود. لوله و پلی‌اورتان مورد استفاده به‌همراه لوله‌های بالج شده در شکل ۱۸ قابل مشاهده است. بررسی هندسهٔ سنبه کروی در شکل‌دهی شدید لوله‌های جدارنازک با استفاده از ابزار الاستومری توسط شاپورگان (۱۳۹۴) انجام گرفت [۱۹]. در این پژوهش با استفاده از روش جدید تغییر شکل شدید پلاستیک[32] با نام استحکام‌دهی بر لوله با استفاده از لایهٔ لاستیکی[33] سعی در بهینه‌سازی نحوهٔ طراحی و قطر بخش محدب سنبه شده است. در فرایند ذکرشده یک سنبه که دارای قسمتی محدب در مرکز آن است به داخل لوله رانده می‌شود، در حالی‌که توسط یک لاستیک میله‌ای مقید گشته است. در نتیجه قطر اولیه لوله به‌طور موضعی افزایش یافته و سپس با پایین‌تر رفتن سنبه توسط فشار لاستیک به ابعاد اولیه خود برمی‌گردد (شکل ۱۹). لولهٔ مورد استفاده در این پژوهش از جنس آلومینیم می‌باشد و به‌منظور شبیه‌سازی فرایند از نرم‌افزار المان محدود آباکوس استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین کرنش در عین سالم بودن نمونه زمانی حاصل می‌شود که قطر بخش محدب سنبه، حداکثر به اندازهٔ قطر خارجی لوله باشد. همچنین این روش دارای مزیت همگنی کرنش اعمال شده و کمتر بودن نیروی مورد نیاز نسبت به روش فشار در کانال لوله-ای[34] می‌باشد.

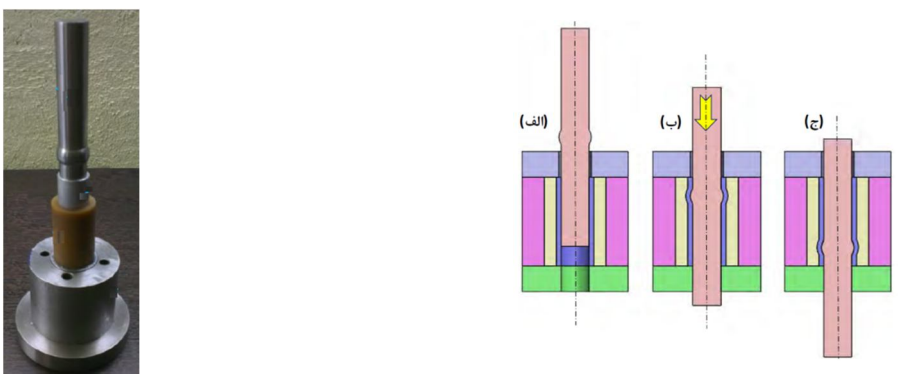
شکل ۱۶. چین‌خوردگی در لوله به‌سبب اصطکاک زیاد بین لوله و قالب [۱۶]



شکل ۱۷. خم‌کردن لوله با استفاده از ابزار الاستومری [۱۷]



شکل ۱۸. لوله و الاستومر مورد استفاده به‌همراه برخی از قطعات شکل‌داده شده [۱۸]



شکل ۱۹. شماتیک فرایند به‌همراه مجموعهٔ قالب [۹]

۳. نتیجه‌گیری

مطالعه فرایند شکل‌دهی با ابزار الاستومری در شکل‌دهی ورق‌ها و لوله‌های فلزی در سال‌های اخیر مورد استقبال پژوهشگران قرار گرفته است. با توجه به مزایای این فرایند ایده‌های متفاوتی از جانب محققان مختلف ارائه و استفاده از ابزار الاستومری اجرا شده است. هدف تمامی این محققان امکان‌سنجی استفاده از ابزار الاستومری، بهبود قابلیت شکل‌دهی و تولید قطعات سالم و بدون عیب از قبیل پارگی، چروکیدگی و جز این‌هاست. چون از یک الاستومر می‌توان برای شکل‌دهی چند قطعه استفاده نمود، باید در انتخاب الاستومر به این نکته توجه داشت که محدودهٔ دمایی مورد استفاده از آن بسیار مهم است و سختی الاستومر روی فرایندها تأثیرگذار نیست و تنها بر تعداد استفاده از الاستومر اثرگذار است.

همچنین نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که پلی‌اورتان به‌دلیل دارابودن خواصی از قبیل مقاومت به سایش بالا، ظرفیت تحمل بار بالا در مقایسه با سایر لاستیک‌ها و همچنین محدودهٔ دمای سودمند آن (۳۰ تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد) مناسب‌ترین نوع الاستومر مورد استفاده برای فرایند شکل‌دهی با ابزار الاستومری است. نکتهٔ مهم دیگری که هنگام استفاده از ابزار الاستومری در فرایندها به‌چشم می‌خورد، اصطکاک ناشی از تماس بین الاستومر و ورق‌ها (یا لوله‌ها) است که نقش مهمی بر عملکرد فرایند و خواص نهایی قطعه دارد. تمامی پژوهشگران این حوزه اذعان دارند که با ایجاد شرایط مناسب برای اصطکاک می‌توان به نتایج مطلوبی دست یافت. بنابراین می‌توان در شکل‌دهی ورق با کنترل اصطکاک بین

ورق و الاستومر، کیفیت و شکل‌پذیری ورق را افزایش داد. همچنین در شکل‌دهی لوله، اصطکاک سبب بیشتر واردشدن لوله با ناحیهٔ تغییر شکل و بنابراین از نازک‌شدن بیش از اندازهٔ لوله جلوگیری کرد و باعث افزایش میزان انبساط‌دهی لوله یا تغییر شکل در لوله خواهد شد. تحقیقات انجام‌شده در این زمینه نشان می‌دهند که فرایند شکل‌دهی با ابزار الاستومری می‌تواند تکنیکی عملی برای ساخت و تولید قطعات صنعتی باشد. به‌عنوان مثال می‌توان از این فرایند در خم‌کاری ۱۳۵ درجه ورق در یک مرحله و یا ساخت صفحات محفظهٔ سوخت استفاده کرد. همچنین می‌توان با تلفیق برخی از فرایندها با ابزار الاستومری در مقایسه با حالتی که از الاستومر استفاده نشده است به نتایج بهتر و قابل قبولی دست پیدا کرد. استفاده از ابزار الاستومری در فرایندهای تغییر شکل پلاستیک شدید، خم‌کردن لوله، شکل‌دهی با لیزر و شکل‌دهی چندنقطه‌ای برخی از این فرایندها می‌باشد.

٤. مآخذ

[1] R. Joseph, S. L. Semiatin. *Metals Handbook: Forming and forging*, American Society for Metals, 1978, pp. 978.

[2] M. Ramezani, Z. M. Ripin, *Rubber-Pad Forming Processes: Technology and Application*, Woodhead publishing: Sawston, UK, 2012, pp. 310.

[۳] ا. مهشیدی‌فر، م. می‌آبادی، فرایند شکل‌دهی با بالشتک‌های لاستیکی، *دوماهنامه قالب‌سازان*، ش. ۵۷، ص. ۶۸-۷۱، ۱۳۸۹.

[4] S. K. De, J. R. White, *Rubber Technologist's Handbook*, No. 1, Rapra Technology Limited, 2001.

[۵] ف. باقری، م. صدیقی، ر. معدولیت، بررسی تاثیر طول خم‌کاری و شعاع قالب بر برگشت فنری در خم‌کاری ۱۳۵ درجه با استفاده از بالشتک لاستیکی، *پنجمین کنفرانس شکل‌دهی فلزات و مواد ایران*، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۹۰.

[6] M. H. Dirikolu, E. Akdemir, Computer aided modelling of flexible forming process, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 148, No. 3, pp. 376–381, 2004.

[7] M. Ramezani, Z. M. Ripin, R. Ahmad, Computer aided modelling of friction in rubber-pad forming process, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 209, No. 10, pp. 4925-4934, 2009.

[8] Y. Liu, L. Hua, Fabrication of metallic bipolar plate for proton exchange membrane fuel cells by rubber pad forming, *J. Power Sources*, Vol. 195, No. 11, pp. 3529-3535, 2010.

[9] M. Ramezani, Z. M. Ripin, R. Ahmad, Sheet metal forming with the aid of flexible punch, numerical approach and experimental validation, *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, Vol. 3, No. 3, pp. 196–203, 2010.

[۱۰] ب. زارع، ع. وفایی‌صفت، و. ریخته‌گر، بررسی تجربی و عددی شکل‌دهی ورق‌های فلزی با استفاده از فرایند شکل‌دهی چند نقطه‌ای، *فصلنامه مکانیک هوافضا (ساخت و تولید)*، جلد ۸، ش. ۴، ص. ۷۵-۸۷، ۱۳۹۱.

[11] A. Mahshidifar, A. Vafaeesefat, Numerical and experimental study of parameters affecting metal forming using rubber pads, on parts with radius of curvature, *Int. J. Adv. Des. Manuf. Technol.*, Vol. 6, No. 1, pp. 9–17, 2013.

[12] Z. Shen, H. Liu, X. Wang, W. Cuntang, *Improving the Forming Capability of Laser Dynamic Forming by using Rubber as a Forming Medium*, Appl. Surf. Sci., 2016.

[۱۳] ح. بیسادی، م. کلانتری‌دهقی، تحلیل عددی و تجربی اثر هندسه قالب و قطعه بر روی فرایند بالج فرمینگ لوله‌های تی‌شکل، *دهمین کنفرانس ملی مهندسی ساخت و تولید*، بابل، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ۱۳۸۸.

[۱۴] ح. بیسادی، م. کلانتری‌دهقی، بررسی اثر اصطکاک بر روی فرایند بالج فرمینگ لوله‌های تی‌شکل به کمک تحلیل‌های عددی و تجربی، *دهمین کنفرانس ملی مهندسی ساخت و تولید*، بابل، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ۱۳۸۸.

[۱۵] م. درویشی حسینی آهنگر، م. صدیقی، م. خاندایی، بکارگیری روش شکل‌دهی به کمک لاستیک در انقباض موضعی لوله به منظور مونتاژ لوله در سازه خودرو، *فصلنامه*

304 stainless steel seamed tube using elastic pad, *Modares Mech. Eng.*, Vol. 15, No. 4, pp. 30-40, 2015.

[۱۹] ا. شاپورگان، ق. فرجی، بررسی هندسه سنبه کروی در فرایند جدید شکل‌دهی شدید لوله‌های جدار نازک با استفاده از سنبه و لاستیک، *کنفرانس بین‌المللی یافته‌های نوین پژوهشی در مهندسی صنایع و مهندسی مکانیک*، تهران، موسسه آموزش عالی نیکان، ۱۳۹۴.

فرایندهای نوین ساخت و تولید، جلد ۱، ش. ۳، ص. ۷۱-۷۷، ۱۳۸۹.

[16] A. C. Girard, Y. J. Grenier, B. J. Mac Donald, Numerical simulation of axisymmetric tube bulging using a urethane rod, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 172, No. 3, pp. 346–355, 2006.

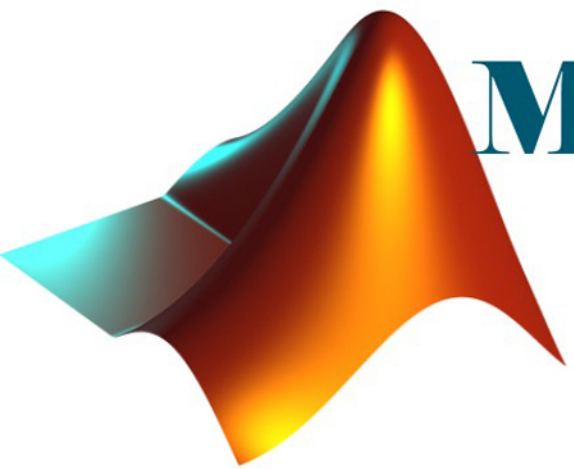
[17] S. Baudin, P. Ray, B. J. Mac Donald, M. S. J. Hashmi, Development of a novel method of tube bending using finite element simulation, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 153, pp. 128–133, 2004.

[18] H. Ghaforian Nosrati, M. Gerdooei, Experimental and numerical study of friction in free bulging

پی‌نوشت

1. Bulk forming
2. sheet forming
3. plastic deformation
4. elastic deformation
5. spring back
6. rubber or elastic pad forming
7. flexible die forming
8. pad
9. rod
10. epoxy
11. Guerin
12. Verson-Wheelon
13. trapped-rubber
14. Marform
15. Maslennikov
16. Demarest
17. natural rubber
18. Styrene-Butadiene rubber
19. silicone rubber
20. Polyurethane
21. Carbamate
22. hemming
23. shore A
24. Ansys
25. Lin Hua
26. laser dynamic forming
27. Wang
28. bulging
29. Abaqus
30. Mac Donald
31. Mooney-Rivlin
32. sever plastic deformation
33. rubber pad tube straining
34. tubular channel pressing

دوره نرم افزاری



MATLAB

محتوی و سرفصل

دوره :

I. معرفی کلی نرم افزار متلب، تاریخچه و تکامل نرم افزار
II. جبر خطی عددی
III. پلات
IV. اینترپولیشن
V. محاسبات سیمبولیک
VI. برنامه نویسی به کمک متلب
VII. معرفی و اصول حل عددی معادله دیفرانسیل
VIII. سیمولینک

شروع دوره :

۵ اسفند ۹۵

جهت پیش ثبت نام به وب سایت انجمن مراجعه نمایید

(۱۵٪ تخفیف عضویت ، ۱۰٪ تخفیف دانشجویی)