



بررسی مقایسه‌ای شکل‌دهی سرد و داغ لوله‌های کامپوزیت فلزی مس-آلمینیوم توسط فرآیندهای شکل‌دهی هیدروفرمینگ و گاز فرمینگ

جوادشهبازی کرمی^۱، محمد مراد شیخی^{۲*}، غلامحسن پایگانه^۳، کرامت ملک‌زاده^۴

۱- دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران
 ۲- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران
 ۳- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران
 ۴- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران
 * تهران، صندوق پستی ۱۶۳-۱۶۷۸۵، m.sheikhi@srttu.edu

چکیده

اطلاعات مقاله

امروزه شکل‌دهی لوله‌های چندلایه با توجه به کاربرد گسترده آن در صنایع هوافضا، نفت و پتروشیمی و بررسی شکل‌پذیری آن توسط فرآیندهای مختلف شکل‌دهی مورد توجه محققان قرار گرفته است. در این پژوهش بررسی مقایسه‌ای شکل‌پذیری لوله‌های دولایه کامپوزیت فلزی در فرآیند شکل‌دهی سرد و داغ در یک الگوی هندسی بالچ قالب بسته، تحت تأثیر شرایط فرآیندی آزمایش هیدروفرمینگ و دمش گاز مورد مطالعه قرار گرفته است، به طوری که نحوه عملکرد هر یک از فرآیندها در شکل‌دهی لوله‌های دولایه مس (داخلی) - آلومینیوم (خارجی)، بر میزان چروکیدگی، پارگی، کمانش و کنترل توزیع ضخامت در محدوده پروفیل قالب بالچ شکل، در حالت‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. فرآیند هیدروفرمینگ در دمای محیط و ماکزیمم فشار ۳۰۰ بار انجام شده است. همچنین فرآیند دمش گاز در دمای ۵۵۰ درجه سانتیگراد و فشار ۴۰ بار صورت پذیرفته است. نسبت انبساط لوله دولایه در فرآیند دمش گاز، در حالت مقایسه‌ای با فرآیند هیدروفرمینگ به میزان ۱.۳۵ درصد افزایش و قبل از پرشدگی قالب دچار ترکیدگی شده است. نمونه سالم بالچ قالب بسته در فرآیند هیدروفرمینگ با فشار شکل‌دهی ۲۸۰ بار و الگوی بارگذاری خطی ۶ میلی متر، ماکزیمم نازک‌شدگی به مقدار ۱.۶۵ میلی متر شکل داده شده است.

دریافت: ۹۵/۰۶/۱۷
 پذیرش: ۹۵/۱۰/۲۱

کلیدواژگان:

شکل‌دهی سرد و داغ
 هیدروفرمینگ لوله
 شکل‌دهی با گاز
 شبیه‌سازی المان محدود

An investigation into the comparison between hot and cold forming of copper-aluminum composite tubes by utilizing hydroforming and gasforming processes

Javad Shahbazi-Karami¹, Mohamad Morad-Sheikhi^{2*}, Gholamhasan Payganeh¹, Keramat Malekzadeh²

1- Faculty of Mechanical Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran

2- Aerospace Research Center, Maleke Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 16785-163, Tehran, Iran, m.sheikhi@srttu.edu

Keywords

Cold and hot forming
 Tube hydroforming
 Gas forming
 Finite element simulation

Abstract

Nowadays the formability of multi-layered tubes through different kinds of forming processes has been of interest to researchers due to its vast applications in aerospace, oil and petrochemical industries. This study compares cold forming and hot forming of bi-layered composite tubes via hydroforming and gas blow forming the tubes in geometrical model of a closed die bulge. The effect of these forming processes operational conditions on the bi-layered copper (inside) – aluminum (outside) tubes forming, wrinkling, bursting, buckling and the thickness distribution controlling on the die profile region in various situations were investigated. Hydroforming process was executed at ambient temperature with the maximum pressure of 300 bar. The process of blow gas forming at 550 ° C temperature and 40 bar pressure was implemented. The expansion ratio of the bi-layered tube during the gas blow forming process exceeded 1.35 % in comparison that of hydroforming process. In addition, the die experienced burst before the fitting during the gas blow forming process. The undamaged closed die bulge was formed through 280 bar hydroforming process with the conditions of 6 mm linear loading and 1.65 mm maximum thinning.

Please cite this article using:

Shahbazi-Karami, J. Morad-Sheikhi, M. Payganeh, Gh. and Malekzadeh, K. "An investigation into the comparison between hot and cold forming of copper-aluminum composite tubes by utilizing hydroforming and gasforming processes", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 4, No. 2, pp. 205-218, 2017.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

۱- مقدمه

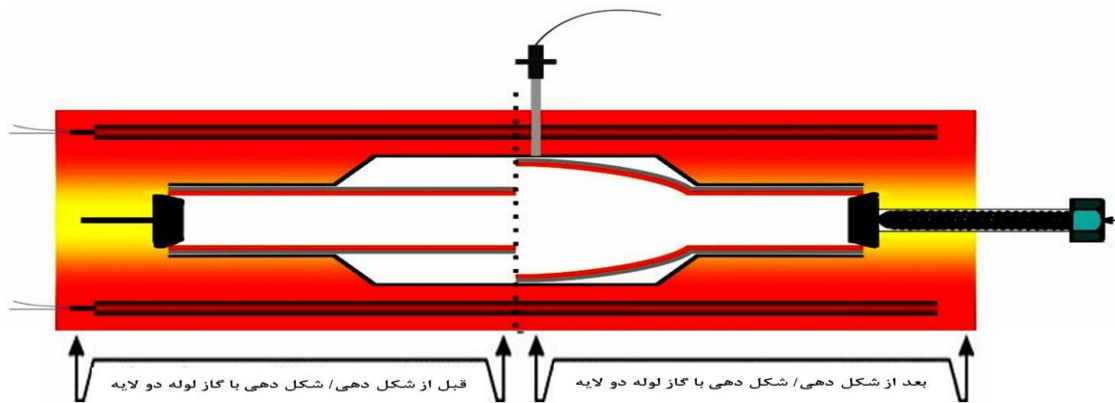
در سال‌های اخیر، با پیشرفت فناوری در صنعت و کاربرد قطعاتی با استحکام بالا و مقاوم به خوردگی، شکل‌دهی لوله‌های دولایه فلزی موردتوجه محققان قرار گرفته است. از طرفی در برخی از کاربردهای خاص، لازم به استفاده از یک اجزای لوله‌ای چندلایه می‌باشد، به طوری که فرآیند شکل‌دهی مورد استفاده و نحوه تولید آن نقش عمده‌ای در بهبود و کیفیت محصول تولید شده ایجاد می‌نماید [۱،۲]. تکنولوژی شکل‌دهی هیدروفرمینگ، به فرآیندی اطلاق می‌گردد که در آن از فشار سیال برای شکل‌دهی با ابزار انعطاف‌پذیر قطعات استفاده می‌گردد [۳]. به طوری که مطالعات مختلف شکل‌دهی لوله توسط فرآیند هیدروفرمینگ با الگوهای مختلف فشار شکل‌دهی، به بررسی مقایسه‌ای میزان شکل‌پذیری حالت‌های تک‌لایه و دولایه در قالب‌های مختلف شکل‌دهی گردیده است [۴]. بررسی‌های انجام شده در فرآیند هیدروفرمینگ لوله، علاوه بر در نظر گرفتن فشار شکل‌دهی بهینه، اعمال تغذیه محوری مناسب و کنترل آن در راستای بهبود و کنترل توزیع ضخامت لوله شکل‌داده شده در پروفیل قالب نقش مهمی ایجاد می‌نماید [۵]. به طوری که عامل استفاده از تغذیه محوری در شکل‌دهی لوله‌های دولایه، سبب بهبود میزان شکل‌پذیری و عدم استفاده از فشار شکل‌دهی بالاتر از حد متعارف در فرآیند هیدروفرمینگ لوله شده است [۶]. با تجهیز نمودن مجموعه آزمایشگاهی هیدروفرمینگ (سرد) به یک سیستم گرمایی و تبدیل به سازوکار هیدروفرمینگ (گرم)، عامل محدودیت استفاده از فشار بالای شکل‌دهی و بستن مجموعه قالب به منظور تحمل فشار شکل‌دهی تا حدودی کاهش می‌یابد [۷]. با استفاده از تغذیه محوری و برطرف نمودن عیوب چروکیدگی در دمای شکل‌دهی هیدروفرمینگ گرم، قابلیت شکل‌پذیری آلیاژهای استحکام بالا در این فرآیند افزایش می‌یابد [۸]. از محدودیت تحمل سیال شکل‌دهی در دمای کاری هیدروفرمینگ گرم، با کنترل میزان دمای کاری در محدوده سیال شکل‌دهی (قالب و لوله) در شرایط فرآیندی آزمایش دستیابی به نمونه سالم می‌باشد [۹]. به طوری که با تعیین معیار شکست در شکل‌دهی هیدروفرمینگ گرم لوله، قابلیت میزان شکل‌پذیری قابل تشخیص می‌باشد [۱۰]. شکل‌دهی گرم، از بالای دمای اتاق تا زیر دمای تبلور مجدد بوده و شکل‌دهی داغ به دماهای بالای تبلور مجدد اطلاق می‌گردد. در این میان فرآیند شکل‌دهی داغ توسط دمش گاز، به منظور استفاده از فشار شکل‌دهی پایین، قابلیت شکل‌دهی آلیاژهای استحکام بالا، بستن مجموعه قالب با استفاده از پرس تناژ پایین مورد نظر محققان قرار گرفته است [۱۱].

پرتودزفولی و همکاران [۱۲]، با بررسی شکل‌پذیری هیدروفرمینگ لوله دولایه با تغذیه محوری به صورت تجربی و عددی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داد که شکل‌دهی تحت فشار ۴۰ مگاپاسکال با میزان تغذیه محوری ۸ میلی‌متر حالت مناسبی از شکل‌پذیری را به همراه دارد. لوح موسوی و همکاران [۱۳]، با استفاده از اعمال فشار نوسانی در شکل‌دهی هیدروفرمینگ دولایه، مدل اصلاح‌شده‌ای ارائه دادند. آنها دریافتند که فشار نوع نوسانی حالت بهتری از توزیع ضخامت با ماکزیمم فشار یکنواخت ایجاد می‌کند. سید کاشی و همکاران [۱۴]، شکل‌دهی لوله‌های دولایه با استفاده از تغذیه محوری به روش هیدروفرمینگ پرداختند. آنها دریافتند که بهترین نمونه شکل داده شده در شکل‌دهی لوله دولایه مس-آلمینیوم در فشار ۶۱ مگاپاسکال ایجاد می‌شود. الاسواد و همکاران [۱۵]، با بررسی المان محدود شکل‌دهی لوله‌های تک لایه و دولایه T شکل توسط فرآیند هیدروفرمینگ پرداختند. نتایج حاصل از این پژوهش، تعیین الگوی

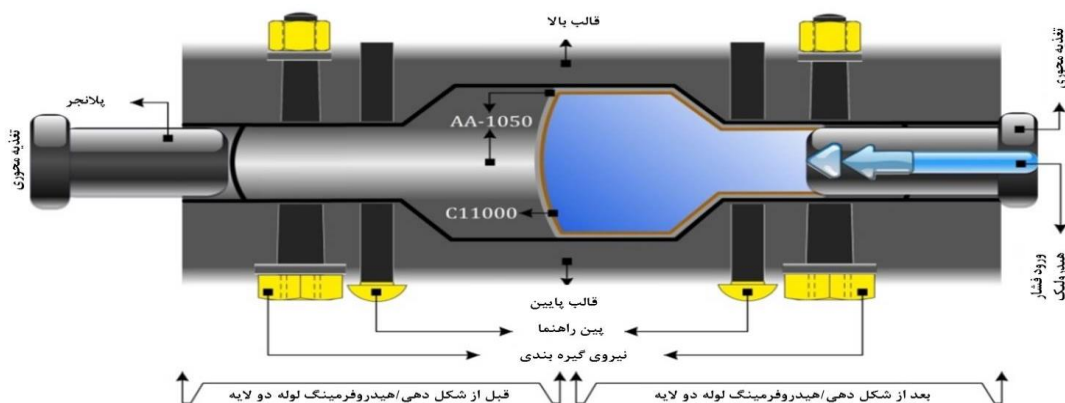
مسیر بارگذاری مناسب در نوع شکل‌دهی لوله دولایه مس-برنج در قالب T شکل می‌باشد. اسلام و همکاران [۱۶]، شکل‌دهی لوله‌های دولایه به صورت تجربی و شبیه‌سازی در قالب X شکل را مورد مطالعه قرار دادند. ماکزیمم فشار داخلی به منظور شکل‌دهی تا ۳۷/۵ مگاپاسکال اعمال گردید. اسلام و همکاران [۱۷]، در پژوهشی دیگر با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود، به بررسی میزان تنش‌ها در شکل‌دهی هیدروفرمینگ لوله دولایه در قالب T شکل پرداختند. آنها دریافتند با افزایش فشار داخلی میزان ارتفاع برآمدگی افزایش خواهد یافت و بیشترین تمرکز تنش در ناحیه مرکزی برآمدگی تحت تأثیر فشار داخلی ایجاد شده است. پایگانه و همکاران [۱۸]، با استفاده از روش المان محدود، به مقایسه فرآیند هیدروفرمینگ لوله تک لایه، دولایه و سه‌لایه پرداختند. آنها الگوی مسی‌های بارگذاری را در شکل‌دهی هریک از لوله‌ها مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که استفاده از مسیر بارگذاری مناسب با اعمال فشار داخلی قبل از تغذیه محوری، علاوه بر بهبود شکل‌پذیری سیستم سه‌لایه، حداکثر میزان بالج در نمونه ایجاد شده است. شهبازی کرمی و همکاران [۱۹]، به مطالعه پارامترهای هندسی در ایجاد یک لوله سانویچی سه‌لایه جدید با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود پرداختند. فوم آلومینیومی به عنوان لایه میانی مابین لایه مس (داخل) و برنج (خارج) استفاده شده است. آنها دریافتند که شکل‌گیری لوله در قالب X شکل، حداقل میزان توزیع ضخامت و حداکثر تنش در منطقه میانی لوله ایجاد شده است.

هوانگ و همکاران [۲۰]، به مطالعه بررسی شکل‌پذیری هیدروفرمینگ لوله از جنس آلومینیوم T4-6063، در قالبی با مقطع مربعی شکل پرداختند. آنها با آنیل نمودن نمونه‌های آزمایش، قابلیت شکل‌پذیری لوله‌های آلومینیوم سری ۶۰۰۰ را افزایش دادند. مسلمی نائینی و همکاران [۲۱]، با شبیه‌سازی و بررسی تجربی شکل‌دهی هیدروفرمینگ گرم لوله در قالب بالج‌شکل، شکل‌پذیری آلیاژ آلومینیوم ۱۰۵۰ را مورد مطالعه قرار دادند. آنها دریافتند که با افزایش مقدار درجه حرارت از دمای محیط تا ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد، با ارتفاع بالج ۴ میلی‌متر می‌باشد. لیو و همکاران [۲۲]، به تأثیر تغذیه محوری در رفتار تغییر شکل‌پذیری انیسانی لوله تیتانیوم 3 al-2.5v در شکل‌دهی داغ لوله به روش دمش گاز پرداختند. نتایج نشان داد که در ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد، مقدار مقاومت کششی تیتانیوم حساس به نرخ کرنش می‌باشد. میچیلینو و همکاران [۲۳]، به بررسی میزان شکل‌پذیری لوله آلومینیوم ۶۰۶۰ در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد توسط فرآیند دمش گاز پرداختند. نتایج نشان داد که افزایش قطر خارجی از ۳۰ تا ۴۳/۸ میلی‌متر در ماکزیمم حالت بالج لوله قبل از ظاهر شدن پارگی می‌باشد. شکل‌دهی داغ لوله‌های چندلایه فلزی توسط دمش با گاز اخیراً مورد توجه محققان قرار گرفته است. شهبازی کرمی و همکاران [۱۱]، به بررسی مقایسه تجربی شکل‌پذیری لوله‌های تک لایه آلومینیوم و دولایه مس-آلمینیوم در فرآیند شکل‌دهی داغ با دمش گاز پرداختند. نتایج حاصل نشان داد که ماکزیمم برآمدگی لوله‌ها تا ترکیب‌دهی در شرایط مدل هم‌دما بهتر از شرایط حالت گرادیانی در شکل‌دهی داغ لوله‌های تک لایه و دولایه می‌باشد.

در این مقاله برای اولین بار، بررسی مقایسه‌ای شکل‌پذیری لوله‌های دولایه کامپوزیت فلزی در فرآیند شکل‌دهی سرد و داغ در یک الگوی هندسی بالج قالب بسته، تحت تأثیر شرایط فرآیندی آزمایش هیدروفرمینگ و دمش گاز مورد مطالعه قرار گرفته است، به طوری که نحوه عملکرد هریک از فرآیندها در شکل‌دهی لوله‌های دولایه مس-آلمینیوم، بر میزان چروکیدگی، پارگی،



شکل ۱ شماتیک عملکرد فرآیند شکل‌دهی داغ لوله‌های دولایه کامپوزیتی توسط فرآیند شکل‌دهی با گاز بصورت داغ HMGF



شکل ۲ شماتیک عملکرد فرآیند شکل‌دهی سرد لوله‌های دولایه کامپوزیتی توسط فرآیند هیدروفرمینگ THF

۳- شکل‌دهی سرد لوله‌های دولایه کامپوزیتی توسط فرآیند (THF)

در شکل ۲ نمای شماتیکی از نحوه عملکرد فرآیند هیدروفرمینگ لوله‌های دولایه فلزی نشان داده شده است. با توجه به محدوده بالچ قالب بسته، قالب بالایی با استفاده پین راهنما در موقعیت قالب پایینی قرار گرفته است. با قرارگیری لوله دولایه فلزی مابین دونیمه قالب، بستن مجموعه توسط پیچ (M10) انجام شده است. با اعمال تغذیه محوری مناسب و فشار سیال، لوله دولایه فلزی در پروفیل قالب به ماکزیمم پرشدگی قالب و نمونه سالم شکل داده می‌شود.

از مهم‌ترین عوامل ساخت قالب شکل‌دهی لوله‌های دولایه در فرآیند هیدروفرمینگ، شامل پرداخت سطوح تماسی دونیمه قالب با یکدیگر، تلرانس ابعادی و موقعیت‌دهی دونیمه قالب، سیستم اعمال تغذیه محوری با الگوی هندسی مناسب پانچ جهت رفع نشتی سیال و گیره‌بندی ایده‌آل مجموعه قالب می‌باشد. در شکل ۳ نمایی از مجموعه قالب و تجهیزات فرآیند شکل‌دهی هیدروفرمینگ لوله‌های دولایه نشان داده شده است. مجموعه قالب ساخته شده به منظور تحمل فشار شکل‌دهی بالا از جنس (SPK) استفاده

جدول ۱ پارامترهای فرآیندی شکل‌دهی لوله‌های تک لایه و دولایه

الگوهای آزمایش	اعمال دمش گاز آرگون	فشار شکل‌دهی (Bar)	دمای شکل‌دهی (°C)
هم‌دما	۲۰ دقیقه بعد از به دما رسیدن مجموعه قالب	۱-۴۰	۵۵۰-۵۷۰
گرادیانی	دمش گاز از دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد	۱-۴۰	۵۵۰-۵۷۰

کمانش و کنترل توزیع ضخامت در محدوده پروفیل قالب بالچ شکل، در حالت‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- شکل‌دهی داغ لوله‌های دولایه کامپوزیتی توسط فرآیند (HMGF)

در شکل ۱ نمای شماتیکی از نحوه عملکرد فرآیند شکل‌دهی داغ لوله‌های دولایه کامپوزیتی توسط دمش گاز نشان داده شده است. انجام عملیات شکل‌دهی بالچ قالب بسته لوله‌های دولایه مس (داخل)-آلمینیوم (خارج)، مورد آزمایش قرار گرفته است.

با توجه به فشار شکل‌دهی خیلی پایین (۴ مگاپاسکال)، عملکرد شکل‌دهی داغ لوله به‌گونه‌ای می‌باشد که مجموعه قالب، توسط یک دستگاه پرس مکانیکی ساده عملیات بستن قالب قابل انجام است.

کل مجموعه قالب وسط المنت‌های حرارتی به تا دمای شکل‌دهی مورد آزمایش مطابق جدول ۱ حرارت داده شده است. مقدار حرارت مشخصه دمای شکل‌دهی با استفاده از ترموکوپل سری K، توسط کنتاکتور (منبع تغذیه جریان به کوره حرارتی) کنترل می‌شود. به‌طوری که سبب ثابت ماندن مقدار حرارت مشخصه در سطح قالب می‌شود.

در انجام آزمایش شکل‌دهی داغ لوله توسط دمش گاز، از دو الگوی شکل‌دهی مدل هم‌دما و گرادیانی به‌منظور بررسی شکل‌پذیری لوله‌های دولایه فلزی استفاده شده است.

آلیاژ C11000 مطابق با استاندارد ASTM C11000 به‌عنوان لایه داخلی استفاده شده است. مشخصات ابعاد هندسی لوله‌ها در فرآیند شکل‌دهی داغ با دمش گاز و هیدروفرمینگ لوله در جدول ۲ نشان داده شده است. ارتفاع محدوده بالچ در قالب H-شکل (D_{in}-H-shape die) در فرآیند گازفرمینگ و همچنین در قالب هیدروفرمینگ لوله (D_{in}-THF die) به میزان ۳۲ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. میزان انبساط لوله‌ها دولایه کامپوزیتی با تعیین ماکزیمم برآمدگی در حالت‌های مختلف شکل‌دهی گرادایانی و هم‌دما در شکل‌دهی داغ، از رابطه (۱) مطابق با شکل ۵ محاسبه گردید. مقدار (D₀) برابر قطر قبل از تغییر شکل و مقدار (D_{max}) برابر ماکزیمم بالچ لوله می‌باشد. همچنین به‌منظور بررسی نیروی تغذیه‌محوری در الگوهای مختلف فشار شکل‌دهی در فرآیند هیدروفرمینگ، مطالعاتی در راستای دست‌یابی به نمونه سالم انجام شد. به‌طوری که در ابتدا به‌منظور برطرف نمودن میزان کماتش، چروکیدگی، پارگی در نمونه‌های دولایه، الگوی نازک شدگی در مسیر فشار و تغذیه محوری مختلف مورد بررسی قرار گرفت. آزمون کشش لوله‌ها در حالت تک لایه مس (C11000) و آلومینیوم (AA1050)، در آزمایشگاه خستگی و شکست دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی انجام شده است.

در شکل ۶، مشخصات لوله‌های دولایه فلزی در شکل‌دهی سرد و داغ بالچ قالب بسته نشان داده شده است.

نمودار تنش-کرنش حقیقی بدست آمده مس و آلومینیوم به ترتیب در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است. بررسی میزان نازک شدگی از قطعات شکل داده شده مطابق شکل ۹ انجام شده است.

۵- شبیه‌سازی اجزای محدود

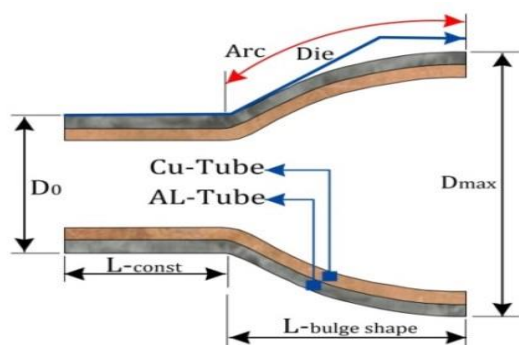
۵-۱- معرفی پارامترهای شبیه‌سازی

به‌منظور شبیه‌سازی هیدروفرمینگ لوله دولایه از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس استفاده شده است. خواص مکانیکی و مشخصات لوله دولایه فلزی مطابق جدول ۳ در شبیه‌سازی اعمال شده است. در شبیه‌سازی قالب

$$\text{Bulge ratio} = \frac{D_{\max} - D_0}{D_0} \times 100 \quad (1)$$

جدول ۲ ضخامت و قطر لوله‌های مورد استفاده در فرآیند شکل‌دهی سرد و داغ

Tube forming	Tubes	D ₀ -Cu/Al	t _{1,2} -Cu/Al
HMGF	AA6061	۲۵/۰۸	۱/۴۵
	C1220	۲۲/۲۲	۱/۲۳
THF	AA1050	۲۴	۱
	C11000	۲۲	۰/۸



شکل ۵ نحوه تعیین نسبت انبساط در شکل‌دهی داغ لوله

گردید. از پمپ دستی به‌منظور اعمال نیروی سیال شکل‌دهی با قابلیت فشار ماکزیمم تا ۲۸۰۰ بار در این آزمایش و از پاورپک برقی ۳۰۰ بار برای اعمال نیروی تغذیه محوری توسط جک‌ها، استفاده گردید. در شکل ۴ سایر تجهیزات بکار گرفته شده در مجموعه آزمایشگاهی لوله‌های دولایه نشان داده شده است. محل تماسی انتهای لوله‌ها با پانچ، کوچک‌ترین نشتی سبب افت فشار سیال شکل‌دهی و عدم موفقیت در فرآیند می‌گردد. از دو حلقه پلی‌اورتان جهت آب‌بندی دقیق پانچ هیدرولیکی در محل تماسی با لوله استفاده شده است. در این پژوهش جهت اعمال تغذیه محوری از دو عدد جک ۲۰ تن اینریک استفاده شده است. از خط‌کش‌های پتانسیومتر نصب شده بر روی هر یک از سیلندرها، مقدار جابجایی پیستون توسط برد الکترونیکی و نرم‌افزار LabVIEW با یکدیگر مقایسه می‌شوند. نمایی از سیلندر استفاده شده به‌منظور اعمال تغذیه محوری و محل قرارگیری واشر آب‌بندی پلی‌اورتان در سطح قالب پایینی، محل عبور شیار پانچ به همراه سایر تجهیزات نشان داده شده است.

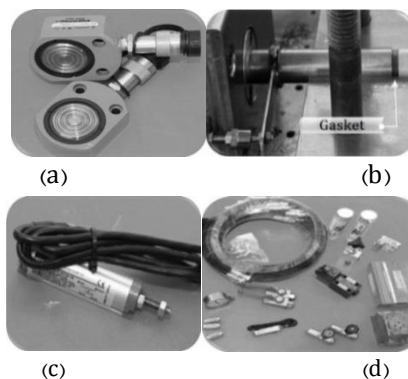
۴- پارامترهای هندسی قالب و جنس لوله‌ها در فرآیندهای شکل‌دهی (HMGF) و (THF)

در فرآیند شکل‌دهی داغ لوله‌های دولایه توسط دمش گاز، لوله آلومینیومی به‌عنوان لایه خارجی و لوله مسی به‌عنوان لایه داخلی استفاده گردید.

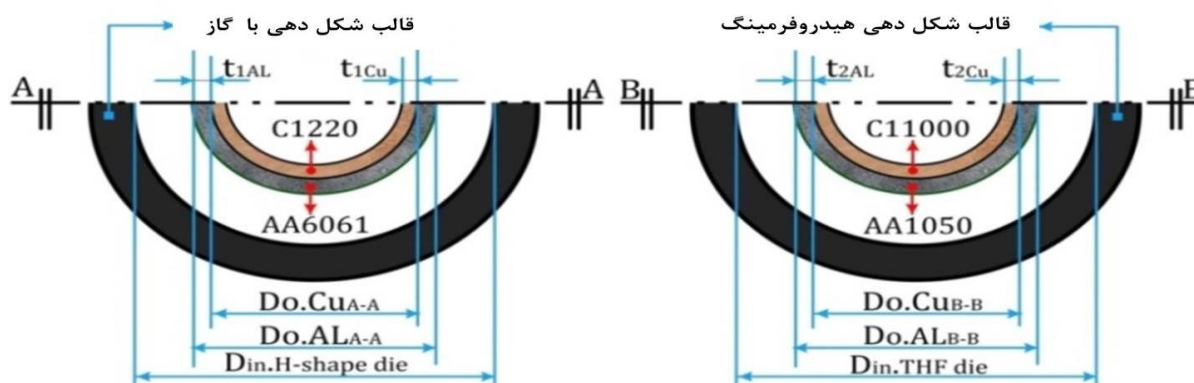
در فرآیند شکل‌دهی سرد هیدروفرمینگ لوله، از آلومینیوم AA 1050 به‌عنوان لایه خارجی مطابق با استاندارد ASTM A، و از لوله مسی از جنس



شکل ۳ مجموعه قالب و تجهیزات فرآیند هیدروفرمینگ



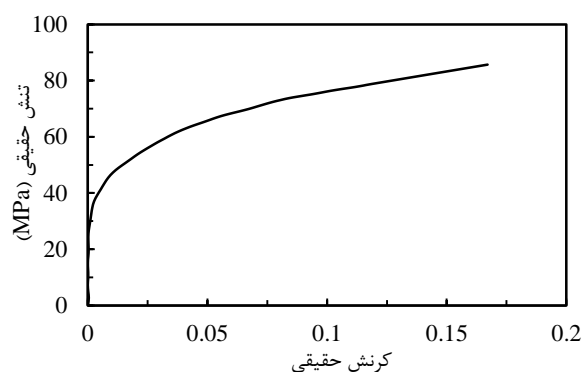
شکل ۴ تجهیزات بکار گرفته شده در فرآیند هیدروفرمینگ، (a) سیلندرهای تغذیه محوری، (b) واشر پلی‌اورتان، (c) خط‌کش پتانسیومتر، (d) اتصالات و تجهیزات مدار هیدرولیک



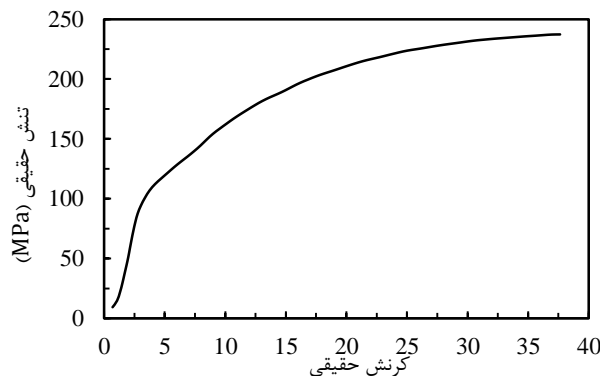
شکل ۶ شماتیک پارامتر هندسی لوله‌های دولایه و ابعاد بالچ قالب بسته در فرآیندهای (THF) و (HMGF)

جدول ۳ خواص مکانیکی لوله مس-آلمینیوم

پارامتر	C11000	AA1050
چگالی، ρ (kg/cm ³)	۸/۹	۲/۷
ضریب استحکام، k (Mpa)	۳۶۵	۱۰۵
توان کار سختی، n	۰/۱۸۵	۰/۰۹
مدول الاستیسیته، E (Gpa)	۸۵	۷۰
ضریب پواسون، ν	۰/۳۲	۰/۳
ماکزیمم تنش کششی σ_{UTS} (MPa)	۲۹۰	۹۹
تنش تسلیم σ_y (MPa)	۱۳۰	۶۵



شکل ۷ منحنی تنش-کرنش حقیقی AA1050



شکل ۸ منحنی تنش-کرنش حقیقی C11000

شکل‌دهی لوله به صورت صلب تحلیلی و لوله‌ها به صورت تغییرشکل‌پذیر در نظر گرفته شد. برای مدل‌سازی لوله‌ها از المان پوسته‌ای S4R استفاده شده است. المان بندی قالب شکل‌دهی لوله به دلیل مدل صلب در نظر گرفته شده، انجام نشد و در نتیجه تحلیل نگردید.

شرایط تماسی مابین لوله و قالب از الگوریتم زوج تماسی سطح به سطح استفاده شده است. با توجه به اعمال تغذیه محوری به لوله‌ها، قالب شبیه‌سازی شده در تمام جهات مقید شده است. بررسی شکل‌پذیری مناسب لوله‌های دولایه با اعمال تغذیه محوری، در الگوهای مختلف بارگذاری بررسی شده است. به طوری که دست‌یابی به نمونه شکل داده شده سالم تنها با اعمال تغذیه محوری و فشار شکل‌دهی مناسب به منظور جلوگیری از ایجاد چروکیدگی و ماکزیمم نازک شدگی در پروفیل بالچ قالب بسته بررسی شده است. در شکل ۱۰ نمایی از مدل شبیه‌سازی مجموعه قالب و لوله دولایه مس (داخل)-آلمینیوم (خارج) نشان داده شده است.

ابعاد هندسی نهایی قطعه شکل داده شده با تعیین طول اولیه لوله مطابق با تئوری حجم ثابت محاسبه و در شکل ۱۱ نشان داده شده است. تخمین طول اولیه لوله مطابق با رابطه (۲) محاسبه شده است. این نظریه بر اساس فرض عدم تغییر ضخامت لوله در طول منطقه قالب شکل‌گیری، بر اساس قانون حجم ثابت در نظر گرفته شده است.

$$V_2 = V_1 = \pi(D_0 t_0 - t_0^2)L_0$$

$$\rightarrow L_0 = \frac{3293.7}{\pi(24 \times 1.8 - 3.24)} \cong 105 \text{ mm} \quad (2)$$



شکل ۹ اندازه‌گیری توزیع ضخامت نمونه‌های هیدروفرمینگ لوله دولایه

مقدار فشار کالیبراسیون است که برای روش تحلیلی بیشتر است و فشار تسلیم و شکل‌دهی در دو حالت تقریباً برابر می‌باشند. البته با توجه به این‌که در مرحله کالیبراسیون به دو انتهای لوله تغذیه محوری اعمال نمی‌گردد، مقدار فشار نهایی یا کالیبراسیون در ضخامت نهایی تأثیرگذار نیست و هر چه این فشار زیادتر شود بعد از پر شدن گوشه‌های قالب ضخامت قطعه نهایی تغییری نخواهد داشت. مقدار فشار کالیبراسیون به دست آمده از شبیه‌سازی در حالت بدون تغذیه محوری برابر فشار پر شدن قالب در حالت بارگذاری خطی است. در الگوی منحنی فشار بر پایه اسپیلاین، از معادله (۶) به منظور محاسبه منحنی فشار داخلی استفاده گردید. در این رابطه T زمان فرآیند، t_0 ضخامت نهایی لوله، d_i قطر نهایی لوله، K ضریب استحکام و α و β نسبت‌های تنش و کرنش هستند که از معادلات (۷) و (۸) محاسبه گردیده است. در این معادلات σ_b ، ε_a و ε_b به ترتیب تنش در راستای طولی و محیطی و کرنش در راستای طولی و محیطی لوله هستند.

$$P_{yield} = \sigma_{y1} \frac{2t_{01}}{D_{01} - t_{01}} + \sigma_{y2} \frac{2t_{02}}{D_{02} - t_{02}} \quad (3)$$

$$P_{bursting} = \sigma_{u1} \frac{4t_{01}}{D_{01} - t_{01}} + \sigma_{u2} \frac{4t_{02}}{D_{02} - t_{02}} \quad (4)$$

$$P_{calibratio} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{u1} \ln \frac{r_b}{r_b - t_{01}} + \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{u2} \ln \frac{r_b}{r_b - t_{02}} \quad (5)$$

$$P = (1.67T^3 - 4T^2 + 3.33T) \frac{2t_i}{d_i - t_i} \frac{K \left[\left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right) (1 + \beta + \beta^2)^{\frac{1}{2}} 4\alpha \right]}{(1 - \alpha - \alpha^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{\sigma_b}{\sigma_a} \quad (7)$$

$$\beta = \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_a} \quad (8)$$

کرنش در راستای محیطی لوله از معادله (۹) به دست می‌آید و سپس بر اساس قانون حجم ثابت و قانون جریان β و α از معادلات (۱۰) و (۱۱) محاسبه می‌شوند. ε_r کرنش در راستای ضخامت لوله است که با فرض حداکثر نازک شدگی ۳۰٪ محاسبه خواهد شد. ضخامت نهایی (t_i) برابر با ۷۰٪ ضخامت اولیه (t_0) در نظر گرفته می‌شود. با توجه به اینکه در این مقاله هیدروفرمینگ لوله دولایه بررسی شده است برای محاسبه منحنی فشار، مقادیر مربوط به هر لوله با توجه به خواص و ابعاد آن‌ها جداگانه محاسبه گردید و سپس باهم جمع می‌گردند. به منظور در نظر گرفتن تأثیر اصطکاک یک ضریب برابر ۱/۳۵ در مقادیر محاسبه شده ضرب شده است [17].

$$\varepsilon_a = \ln \left(\frac{d_i - t_i}{d_0 - t_0} \right) \quad (9)$$

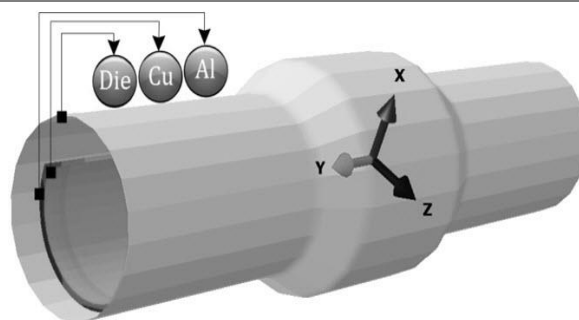
$$\beta = - \left(\frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_a} + 1 \right) \quad (10)$$

$$\alpha = \frac{2\beta + 1}{2 + \beta} \quad (11)$$

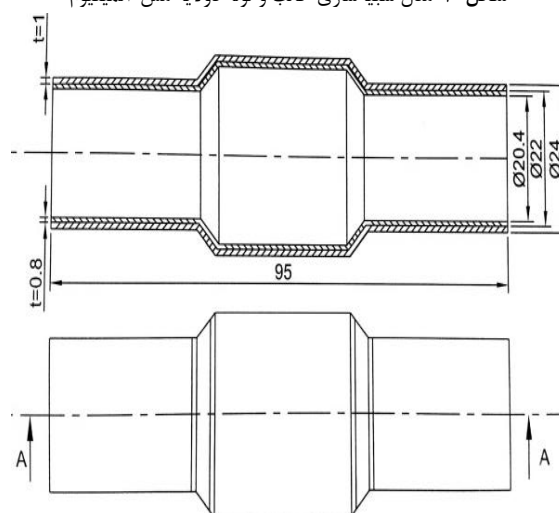
۶- نتایج و بحث

۶-۱- شکل‌پذیری داغ لوله‌های دولایه کامپوزیتی

از جمله پارامترهای تأثیرگذار در شکل‌دهی داغ لوله‌های دولایه، تعیین پارامتر فرآیندی و روش شکل‌دهی در هندسه بالچ قالب ثابت می‌باشد. میزان شکل‌پذیری با توجه به الگوهای شکل‌دهی مدل هم‌دما و گرادانی در شکل ۱۵ نشان داده شده است. با توجه به نوع شکل‌دهی بدون اعمال تغذیه محوری



شکل ۱۰ مدل شبیه‌سازی قالب و لوله دولایه مس-آلمینیوم



شکل ۱۱ ابعاد قطعه نهایی نمونه هیدروفرمینگ

۵-۲- بررسی فشار داخلی در شکل‌دهی فرآیند هیدروفرمینگ

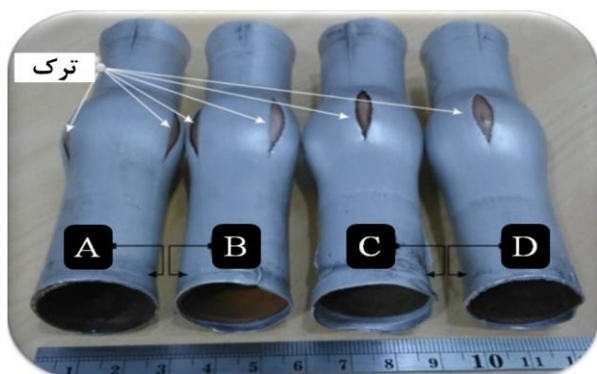
در شکل‌دهی سرد لوله‌های دولایه توسط فرآیند هیدروفرمینگ، الگوهای بارگذاری (مسیر فشار داخلی و اعمال تغذیه محوری) مختلف تأثیر زیادی در نمونه سالم ایجاد می‌نماید. در این فرآیند به منظور دست‌یابی به پروفیل شکل داده شده کامل بالچ قالب بسته، از الگوهای فشار داخلی خطی، مرحله و منحنی فشار بر پایه اسپیلاین به ترتیب مطابق شکل‌های ۱۲، ۱۳، ۱۴ مورد مطالعه قرار گرفته است. به طوری که در الگوهای فشار بکار گرفته شده، تغذیه محوری مناسب از مهم‌ترین پارامتر در میزان پروفیل پرشدگی کامل لوله در قالب شکل‌دهی می‌باشد. در الگوی بارگذاری مرحله‌ای، اعمال تغذیه محوری به منظور جلوگیری از نازک شدگی بیشینه در محدوده بالچ لوله، بعد از فشار تسلیم (P_{yield}) اعمال می‌شود. مقدار فشار ایده آل به منظور تغییر شکل پلاستیکی ر محدوده بالچ لوله، در محدوده فشار شکل‌دهی ($P_{bursting}$) می‌باشد. به منظور جلوگیری از ترکیدگی لحظه‌ای لوله در اثر فشار داخلی^۱ ماکزیمم، تغذیه محوری اعمال می‌شود. در نهایت فشار کالیبراسیون ($P_{calibration}$)، بدون اعمال تغذیه محوری (یا مینیمم مقدار تغذیه محوری) به منظور پرشدگی کامل لوله در قالب شکل‌دهی اعمال شده است. به منظور کنترل و اعمال فشار داخلی در الگوی بارگذاری مرحله‌ای طبق معادلات (۳)، (۴) و (۵) قابل انجام می‌باشد. که در آن σ_{μ} ، حداکثر تنش کششی هر یک از لوله‌ها، t_{01} ، t_{02} و D_{01} ، D_{02} به ترتیب ضخامت و قطر اولیه لوله‌های داخلی و خارجی و r_b شعاع گوشه قالب است. شکل ۱۳ منحنی بارگذاری مرحله‌ای به دست آمده از روش تحلیلی و شبیه‌سازی را بدون اعمال تغذیه محوری مورد مقایسه قرار می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود تنها تفاوت دو منحنی در

^۱ Internal pressure

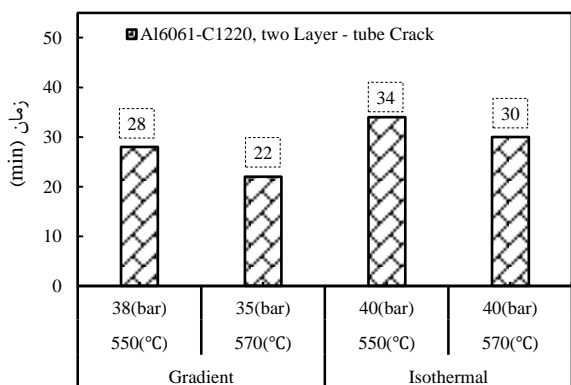
لوله دولایه مس-آلمینیوم شکل داده شده توسط فرآیند دمش گاز نشان داده شده است. همچنین ماکزیمم مقدار بالج لوله‌های دولایه اندازه‌گیری شده در راستای بیشترین میزان شکل‌گرفته نشان داده شده است. شکل ۱۸ نتایج حاصل از بیشترین بالج لوله دولایه تا لحظه وقوع ترکیدگی نشان داده شده است. در مدل هم‌دما به مقدار $33/78$ میلی‌متر در دمای 550 درجه سانتی‌گراد دارای ماکزیمم مقدار خود می‌باشد.

شکل ۶-۲- شکل‌پذیری سرد لوله‌های دولایه کامپوزیتی

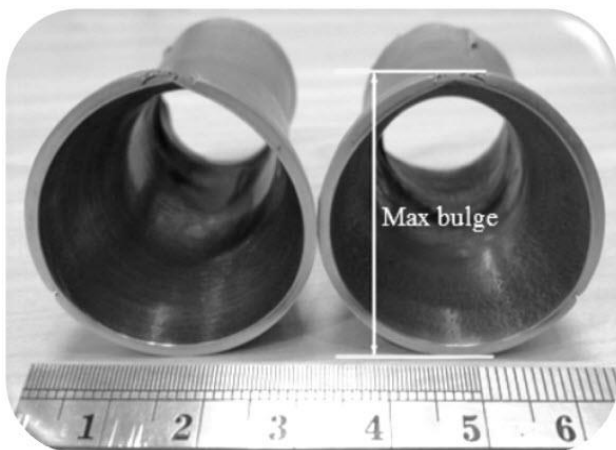
به‌منظور کنترل روند تغییر شکل‌پذیری مناسب لوله‌های دولایه در فرآیند



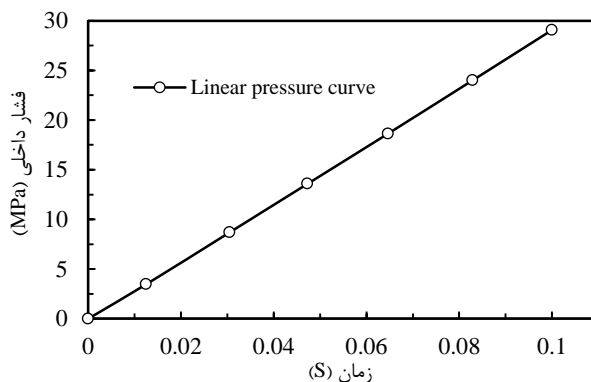
شکل ۱۵ نمونه‌های دولایه شکل داده شده در فرآیند HMGF (A) هم‌دما 550 درجه سانتی‌گراد، (B) گرادیانی 550 درجه سانتی‌گراد، (C) گرادیانی 570 درجه سانتی‌گراد، (D) هم‌دما 570 درجه سانتی‌گراد



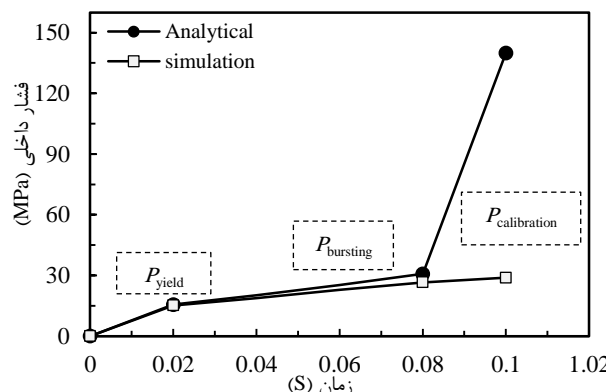
شکل ۱۶ مقایسه‌ای حالت گرادیانی و هم‌دما در شکل‌دهی دولایه Al-Cu در فرآیند HMGF



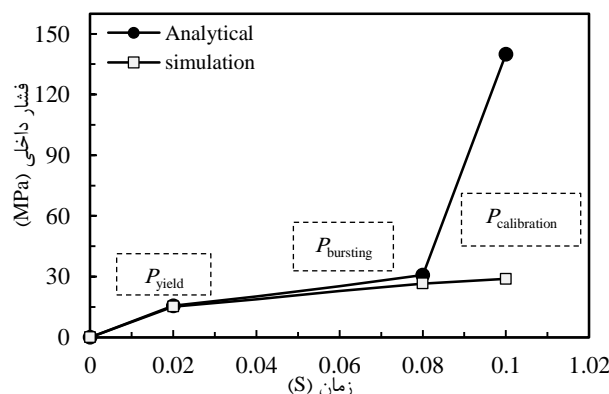
شکل ۱۷ نمایی از ماکزیمم برآمدگی لوله دولایه مس-آلمینیوم



شکل ۱۲ نمودار فشار خطی بدون تغذیه محوری



شکل ۱۳ نمودار بارگذاری مرحله‌ای

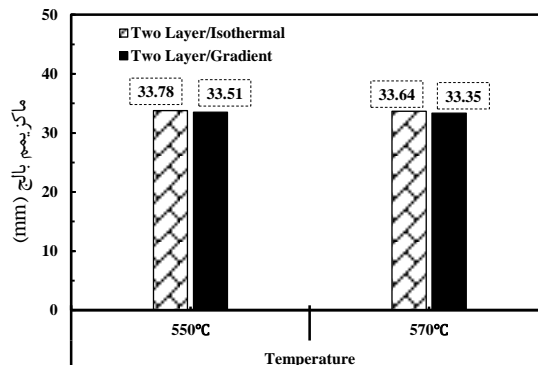
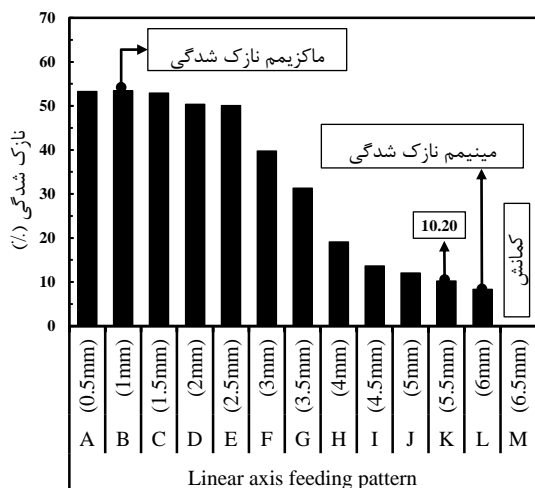


شکل ۱۴ منحنی فشار لوله دولایه بر پایه اسپیلاین

در مدل‌های بکار گرفته شده، تعیین زمان ترکیدگی و میزان بالج لوله‌های کامپوزیتی، از مهم‌ترین پارامترهای بررسی میزان شکل‌پذیری لوله‌های دولایه محسوب می‌شود، به طوری که فرآیندهای شکل‌دهی داغ مدل هم‌دما و گرادیانی را از یکدیگر تفکیک می‌نماید.

در شکل ۱۶ منحنی زمان برحسب فشار ترکیدگی در الگوهای شکل‌دهی هم‌دما و گرادیانی در دماهای مورد آزمایش نشان داده شده است. نتایج حاصل از آزمایش شکل‌دهی داغ لوله‌های دولایه بدون اعمال تغذیه محوری نشان داد، افزایش دما از 550 به 570 درجه سانتی‌گراد سبب کاهش تحمل فشار شکل‌دهی و منجر به تسریع پارگی می‌شود. به طوری که قبل از پرشدگی کامل لوله در پروفیل قالب بالج بسته، ترکیدگی در مقطع ماکزیمم بالج حاصل می‌شود.

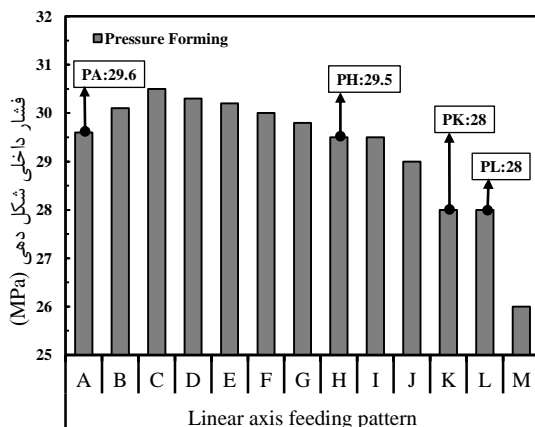
از طرفی مشاهده شد که حالت شکل‌دهی گرادیانی، با تحمل فشار شکل‌دهی پایین‌تر، در مدت‌زمان کمتری ترکیدگی در ماکزیمم بالج لوله نسبت به حالت مدل هم‌دما ایجاد شده است. در شکل ۱۷ نمای برش خورده از ماکزیمم بالج



شکل ۱۸ مقادیر ماکزیمم بالچ لوله دولایه مس-آلمینیوم

هیدروفورمینگ، با استفاده از تغذیه محوری در الگوهای خطی، مرحله‌ای و اسپیرالین مورد بررسی قرار گرفته است. هدف از الگوهای تغذیه محوری مختلف، متناسب با مسیر فشار داخلی برحسب مدل‌های (خطی، مرحله‌ای و اسپیرالین) ارائه شده، تعیین شکل‌پذیری مناسب لوله در قالب بالچ بسته در فرآیند شکل‌دهی سرد می‌باشد. به طوری که در این حالت از فرآیند شکل‌دهی لوله‌های دولایه، قابلیت تشخیص نمونه شکل داده شده سالم، برحسب الگوی مناسب بارگذاری قابل تشخیص باشد. همچنین محدوده عیوب شکل‌دهی که شامل کمانش، ترکیدگی و چروکیدگی تا دست‌یابی به نمونه سالم می‌باشد قابل تشخیص باشد. در شکل ۱۹ الگوهای تغذیه محوری خطی مختلف به منظور کنترل میزان نازک شدگی و دست‌یابی به مینیمم فشار شکل‌دهی تا پروفیل پرشدگی کامل قالب در مدل شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۲۰ نتایج حاصل از درصد نازک شدگی لوله‌های دولایه در الگوهای بارگذاری خطی نشان داده شده است. بررسی‌ها نشان داد که میزان نازک شدگی بیشینه در الگوی بارگذاری خطی با تغذیه محوری مدل (B) با مقدار ۵۳/۴۲ درصد در ناحیه ماکزیمم بالچ لوله‌های دولایه ایجاد می‌شود. به طوری که مینیمم درصد نازک شدگی در الگوی بارگذاری خطی با تغذیه محوری مدل (L) به میزان ۸/۳۵ درصد شکل‌گرفته شده است. هنگامی که تغذیه محوری به ماکزیمم مقدار جابجایی با استفاده از الگوی خطی (M) به میزان ۶/۵ میلی‌متر اعمال می‌شود، کمانش در نمونه اتفاق می‌افتد. با توجه به مقادیر مختلف تغذیه محوری، میزان فشار شکل‌دهی در مدل بارگذاری خطی متفاوت می‌باشد. در شکل ۲۱ مقادیر فشار شکل‌دهی متناسب با تغذیه محوری هریک از الگوهای (A) تا (L) نشان داده شده است. با افزایش تغذیه

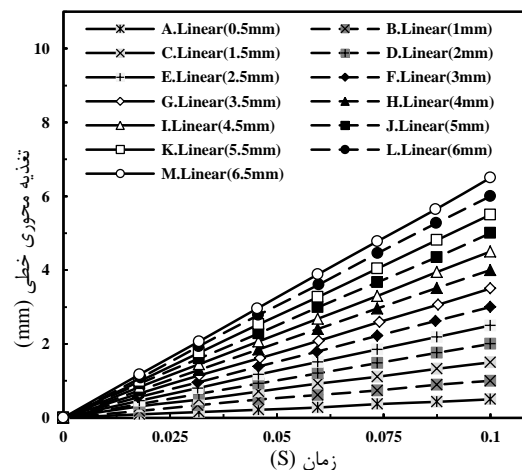
شکل ۲۰ مقادیر نازک شدگی در الگوهای تغذیه محوری خطی



شکل ۲۱ فشار داخلی شکل‌دهی الگوی تغذیه محوری خطی

محوری از مدل (G) تا (L) به کاهش میزان فشار اعمالی تا ماکزیمم پروفیل پرشدگی لوله مشاهده شد. به طوری که مینیمم مقدار فشار شکل‌دهی در الگوی تغذیه محوری (K) به میزان ۲۸ مگاپاسکال می‌باشد. نتایج حاصل از فشار داخلی و تغذیه محوری با بررسی میزان نازک شدگی لوله‌های دولایه نشان داد، که نمونه‌های سالم شکل‌گرفته شده در پروفیل پرشدگی قالب، در فشار داخلی ۲۸ مگاپاسکال و تغذیه محوری ۵/۵ و ۶ میلی‌متر دارای شکل‌پذیری مطلوب می‌باشد.

در شکل ۲۲ مجموعه قطعات شکل داده شده در حاصل از آزمایش تجربی در تعدادی از الگوهای بارگذاری خطی نشان داده شده است. به طوری که اعمال تغذیه محوری مناسب نقش مهمی در قطعه شکل داده شده سالم ایجاد می‌نماید. در نمونه‌های (No.1) و (No.2) حاصل از الگوی بارگذاری (فشار داخلی و تغذیه محوری) خطی (B) و (C) می‌باشد. اعمال تغذیه محوری کم و افزایش فشار داخلی سبب ایجاد ترکیدگی قبل از شکل‌گیری مطلوب قطعه در قالب بالچ بسته می‌شود. در نمونه‌های شکل داده شده (No.3) و (No.4) حاصل از الگوی بارگذاری خطی (F) و (H) می‌باشد. نتایج نشان حاصل از میزان شکل‌پذیری لوله دولایه مس-آلمینیوم در الگوی بارگذاری (H) در نمونه (No.4)، نشان می‌دهد که با افزایش تغذیه محوری و کاهش میزان فشار داخلی از میزان ترکیدگی نسبت به نمونه (No.3) در الگوی بارگذاری (F) تا حدودی کاهش یافته است. اما میزان شکل‌پذیری در قالب بالچ بسته به طور کامل شکل نگرفته است. به طوری که قبل از پروفیل پرشدگی کامل لوله دولایه درون قالب، ترکیدگی در ناحیه ماکزیمم بالچ سبب نشستی سیال از



شکل ۱۹ الگوهای تغذیه محوری خطی در شکل‌دهی لوله‌های دولایه

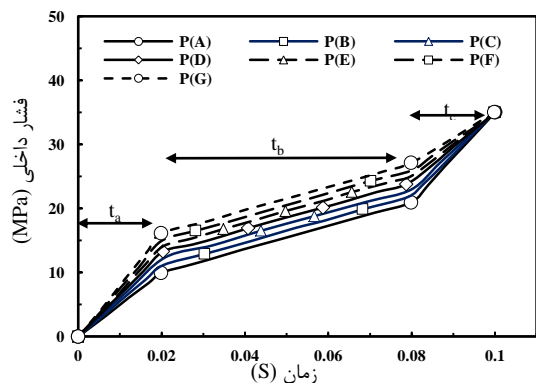
جدول ۴ طول ناحیه ترکیدگی لوله‌های دولایه در فرآیند هیدروفرمینگ

Loading pattern tubes/ L	Length crack(mm)
B/ L ₁	۱۸/۸۵۷
C/ L ₂	۲۶/۰۴۲
F/ L ₃	۲۷/۳۱۸
H/ L ₄	۱۷/۲۰۱



شکل ۲۳ قطعات شکل داده شده لوله های دولایه، (No.6، نمونه سالم، No.7) نمونه چروکیدگی، (No.8، نمونه پارگی توأم با چروکیدگی، No.9) نمونه کمانشی در شکل ۲۴ و ۲۵ به ترتیب الگوی فشار داخلی و تغذیه محوری با استفاده از الگوی بارگذاری مرحله‌ای نشان داده شده است. به طوری که مقادیر هفت فشار با الگوی مرحله‌ای (P(A)) تا (P(G)) متناسب با الگوهای تغذیه محوری در نظر گرفته شده (AF.1) تا (AF.7)، تا ماکزیمم مقدار ۶ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. میزان فشار شکل‌دهی مرحله‌ای به صورت (t_a)، (t_b) و (t_c) به ترتیب شامل محدوده فشار تسلیم، فشار شکل‌دهی و فشار کالیبراسیون اعمال شده است. به منظور بررسی پروفیل شکل‌دهی متأثر از تغذیه محوری مناسب، تمامی الگوهای فشار شکل‌دهی در هریک از مقدار تغذیه محوری به صورت کامل مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. محدوده فشار کالیبراسیون در همه‌ی الگوها به صورت ثابت و متناسب با محدودیت‌های دستگاه هیدروفرمینگ انتخاب شده است. زمان فرآیند شکل‌دهی در تمامی الگوها به میزان ۰/۱ در شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است. بررسی میزان نازک‌شدگی در پروفیل شکل داده شده بالچ قالب بسته، از مهم‌ترین پارامتر تعیین الگوی مناسب بارگذاری می‌باشد.

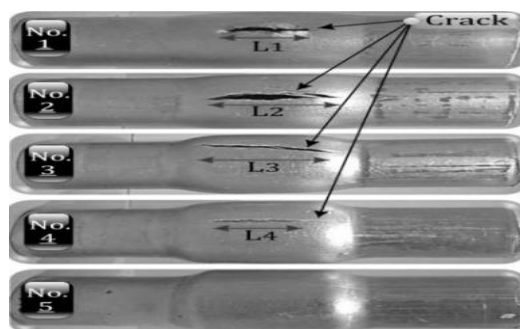
در شکل ۲۶ بررسی میزان نازک‌شدگی در تمامی الگوهای بارگذاری (فشار داخلی و تغذیه محوری) نشان داده شده است. نتایج حاصل از میزان نازک‌شدگی در مدل‌های شبیه‌سازی نشان داد که میزان نازک‌شدگی در الگوی تغذیه محوری (AF.7)، در تمامی الگوی فشار داخلی (P(A)) تا (P(G))



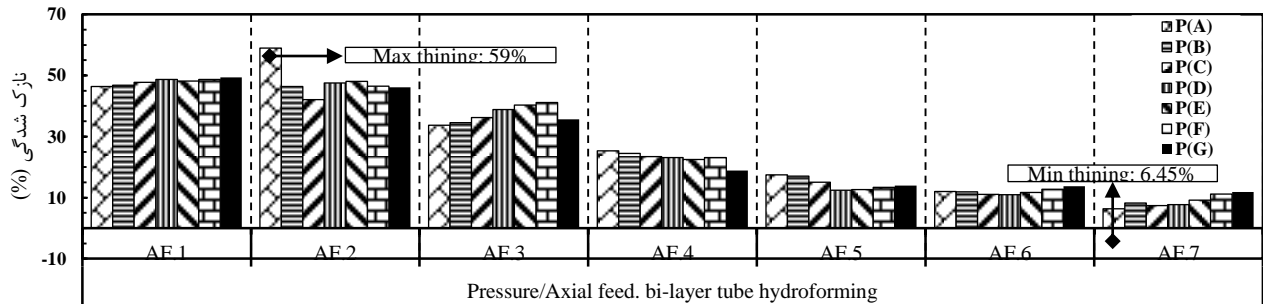
شکل ۲۴ الگوی فشار مرحله‌ای در شکل‌دهی لوله‌های دولایه

لوله به داخل قالب شده و ادامه شکل‌دهی قابل انجام نمی‌باشد. در نهایت در نمونه (No.5) با استفاده از الگوی بارگذاری (K)، نمونه سالم بالچ لوله دولایه مس-آلمینیوم به عنوان مرز ترکیدگی و قطعه سالم شکل داده شده متناسب با تغذیه محوری و فشار داخلی شکل گرفته شده است. در جدول ۴ مقدار طول ترکیدگی نمونه‌ها مطابق الگوی فشار داخلی (B,C,F,H) نشان داده شده است.

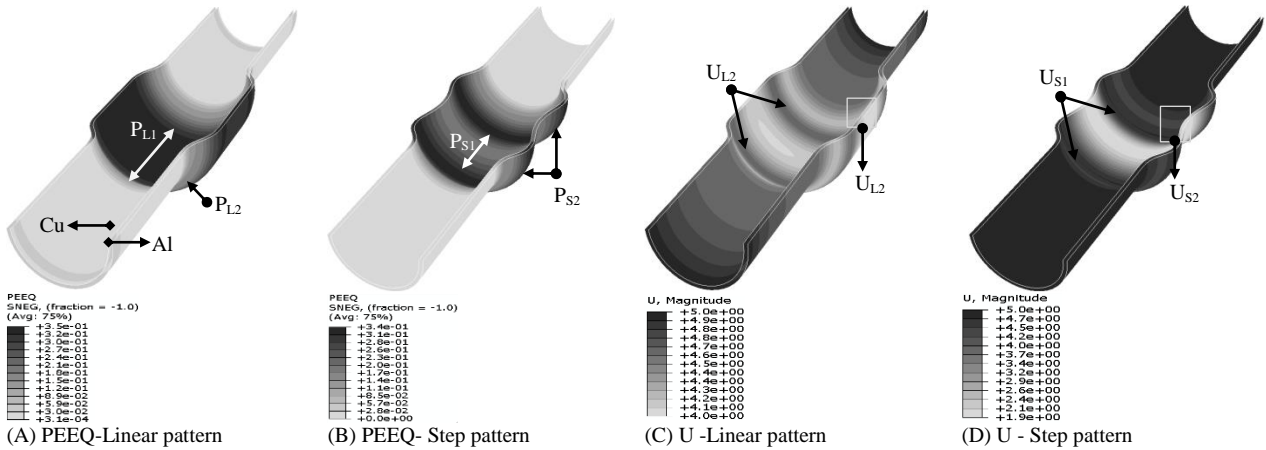
بررسی طول ناحیه پارگی (L₁) و (L₂) نشان می‌دهد که عامل ترکیدگی اعمال فشار شکل‌دهی بالا در میزان تغذیه محوری خیلی پایین در الگوی بارگذاری خطی می‌باشد. به طوری که با افزایش میزان تغذیه محوری و کاهش فشار شکل‌دهی، ناحیه ترکیدگی (L₃) در میزان بالچ بیشتر با طول ناحیه ترکیدگی نزدیک به (L₁) ایجاد می‌شود. با مقایسه‌ی میزان بالچ در نمونه (No.1) با نمونه (No.3)، مشاهده شد که با افزایش میزان تغذیه محوری و کاهش میزان فشار شکل‌دهی پروفیل بالچ شکل بهبود یافته ولی میزان پارگی در محدوده کامل پروفیل بالچ ایجاد شده است. با افزایش میزان تغذیه محوری و کاهش فشار شکل‌دهی در الگوی بارگذاری (H) نسبت به (F)، میزان پارگی در ناحیه ماکزیمم بالچ لوله دولایه کاهش یافته است. به طوری که در نمونه (No.4) در مقایسه با نمونه (No.1) با توجه به اعمال میزان فشار شکل‌دهی در یک محدوده (P_A(29.6) ≈ P_H(29.5))، عامل اصلی بهبود شکل‌پذیری، افزایش میزان تغذیه محوری الگوی (B.Linear) به حالت (H.Linear) می‌باشد. تغییر حالت شکل‌دهی از مقطع ترکیدگی نمونه (No.1) به حالت پارگی نمونه (No.4) در محدوده بالچ لوله دولایه فلزی، با کاهش طول ناحیه (L₁-L₂) به میزان ۱/۶۵۲ میلی‌متر کاهش یافته است. نمونه سالم بالچ لوله دولایه مس-آلمینیوم (No.5)، در فشار شکل‌دهی ۲۸ مگاپاسکال و با استفاده از الگوی تغذیه محوری (K.Linear) به میزان ۵/۵ میلی‌متر، مرز شکل‌دهی نمونه بالچ سالم و نمونه معیوب در الگوی بارگذاری خطی می‌باشد. در شکل ۲۳ نمونه‌های سالم، چروکیدگی، کمانش و حالت توأم پارگی با چروکیدگی در حالت بارگذاری الگوی خطی نشان داده شده است. در نمونه (No.8) چروکیدگی به همراه پارگی در محدوده بالچ با استفاده از فشار شکل‌دهی ۲۹ مگاپاسکال، مطابق با الگوی بارگذاری (L) با میزان تغذیه محوری ۴/۵ میلی‌متر ایجاد شده است. با افزایش میزان تغذیه محوری الگوی (J) به مقدار ۵ میلی‌متر، با فشار داخلی ۲۹ مگاپاسکال، نمونه مطلوب مطابق (No.7) با کمترین میزان چروکیدگی در یک‌طرف شعاع گوشه، شکل گرفته شده است. نمونه (No.6) مطابق با الگوی بارگذاری (L)، در فشار داخلی ۲۸۰ بار دارای مینیمم میزان نازک‌شدگی می‌باشد. کاهش فشار شکل‌دهی به میزان ۲۶۰ بار و افزایش تغذیه محوری در الگوی بارگذاری خطی به میزان ۶/۵ میلی‌متر سبب به وجود آمدن کمانش در لوله دولایه مطابق نمونه (No.9) و عدم شکل‌پذیری شده است.



شکل ۲۲ لوله‌های شکل داده شده دولایه توسط فرآیند هیدروفرمینگ



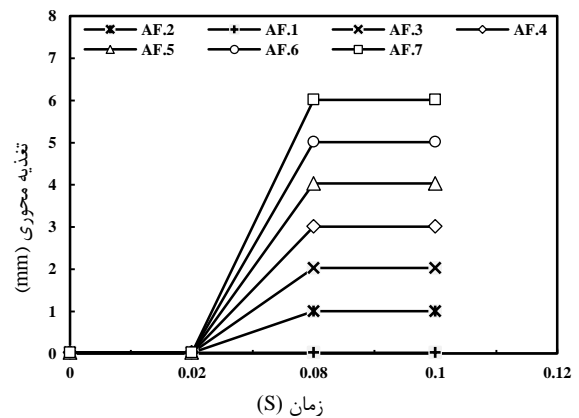
شکل ۲۶ بررسی میزان نازک شدگی در تمامی الگوهای بارگذاری (فشار داخلی و تغذیه محوری)



شکل ۲۷ بررسی مقایسه‌ای الگوهای بارگذاری خطی و مرحله‌ای در شبیه‌سازی لوله‌های دولایه

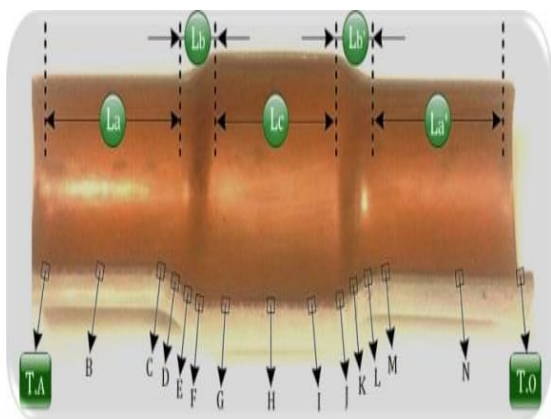
بامطالعه ماکزیمم میزان نازک شدگی، مشاهده شد که افزایش تغذیه محوری نسبت الگوهای مسیر فشار شکل‌دهی تأثیر زیادی در کاهش میزان نازک شدگی بیشینه ایجاد می‌نماید. در شکل ۲۷ نمایی از مدل‌های شبیه‌سازی بارگذاری مرحله‌ای و خطی، در مینیمم میزان نازک‌شدگی لوله‌های دولایه نشان داده شده است.

با توجه به میزان شکل‌پذیری در الگوی بارگذاری خطی نسبت به مرحله‌ای در شکل ۲۷، مشاهده شد که افزایش شکل‌پذیری در جهت پروفیل پرشدگی قالب در محدوده (P_{L1}) در نمونه (A)، سبب افزایش میزان کرنش پلاستیک معادل نسبت به الگوی نمونه (B) در محدوده چروکیده شده (P_{S2}) ایجاد شده است. نحوه جابجایی و تغییر شکل در الگوی بارگذاری خطی (C) در مقایسه با حالت بارگذاری مرحله‌ای (D)، به دلیل مناسب بودن مسیر فشار و الگوی تغذیه محوری سبب بهبود شکل‌پذیری شعاع گوشه شده است. به‌طوری‌که محدوده (U_{L2}) در مقایسه با (U_{S2})، در اثر فشار داخلی از کماتش در محدوده ماکزیمم بالچ جلوگیری شده است. در شکل ۲۸ الگوی تغذیه محوری اسپیلاین بکار گرفته‌شده در شکل‌دهی لوله‌های دولایه نشان داده شده است. بیشترین میزان نازک‌شدگی در محدوده ماکزیمم بالچ قالب به ایجاد شده است. به‌منظور بررسی الگوهای اسپیلاین و مدل ایده‌آل تغذیه محوری، نازک شدگی بحرانی در محدوده پروفیل کامل شکل داده شده حالت دولایه مس-آلمینیوم مطابق شکل ۲۹ اندازه‌گیری شده است. نتایج حاصل از بارگذاری اسپیلاین نشان داد که مینیمم میزان نازک شدگی در الگوی مسیر بارگذاری

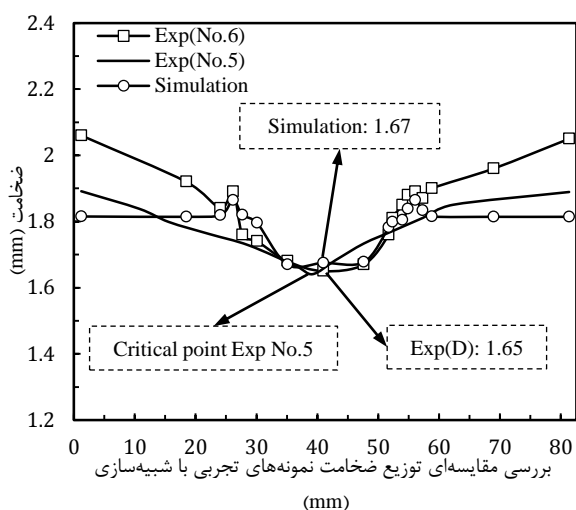


شکل ۲۸ الگوی تغذیه محوری مرحله‌ای در شکل‌دهی لوله‌های دولایه

دارای مینیمم حالت نازک شدگی نسبت به سایر تغذیه محوری (AF.1) تا (AF.6) می‌باشد. به‌طوری‌که در الگوی فشار شکل‌دهی (P(A)) و در تغذیه محوری (AF.7) دارای مینیمم میزان نازک شدگی به مقدار ۶/۴۵ درصد می‌باشد. میزان نازک شدگی با استفاده از الگوهای تغذیه محوری (AF.1) و (AF.2) در تمامی مسیر فشارهای (P(A)) تا (P(G))، نسبت به سایر مسیرهای بارگذاری افزایش یافته است. به‌طوری‌که در حالت بارگذاری مسیر فشار شکل‌دهی (P(A)) و تغذیه محوری (AF.2) دارای ماکزیمم میزان نازک شدگی به مقدار ۵۹ درصد می‌باشد.

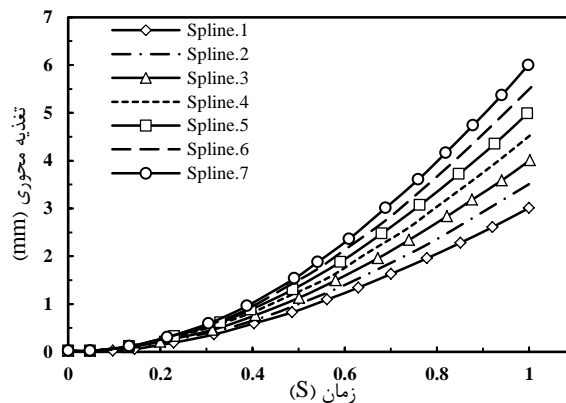


شکل ۳۰ الگوی اندازه‌گیری به‌منظور تعیین ناحیه بحرانی در فرآیند هیدروفورمینگ

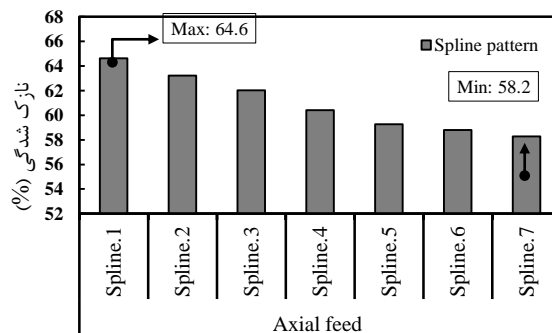


شکل ۳۱ بررسی مقایسه‌ای توزیع ضخامت نمونه‌های تجربی با شبیه‌سازی در فرآیند هیدروفورمینگ

شکل‌پذیری کامل در پروفیل قالب، ترکیب‌دهی در ناحیه ماکزیمم بالچ حاصل شده است. به‌طوری که در فرآیند هیدروفورمینگ با اعمال تغذیه محوری، بالچ لوله دولایه در قالب شکل‌دهی به‌طور کامل شکل گرفته است. در فرآیند هیدروفورمینگ به‌منظور جلوگیری از ترکیب‌دهی زود هنگام، بارگذاری محوری سبب بهبود شکل‌پذیری در پروفیل بالچ قالب شده است. از طرفی اعمال تغذیه محوری در صورت نامناسب بودن آن، سبب عیوبی همچون کماتش و چروکیدگی خواهد شد. همچنین به دلیل افزایش ضریب اصطکاک سطح خارجی لوله در ناحیه تماسی با سطح پروفیل قالب، سبب عدم صافی سطح و کیفیت نمونه شکل داده شده خواهد شد. در شکل ۳۳ نمایی از کیفیت سطح در نمونه سالم (No.5) با استفاده از نیروی تغذیه محوری، در نواحی ثابت غیرقابل تغییر شکل (W1) و (W3) و در محدوده ناحیه بالچ (W2) نشان داده شده است. به‌طوری که با استفاده از روانکار مناسب مابین قالب و لوله، ساییدگی در نمونه کاهش می‌یابد. در فرآیند شکل‌دهی داغ لوله، معایب به وجود آمده با استفاده از تغذیه محوری در فرآیند شکل‌دهی سرد، چندین برابر می‌شود. به‌طوری که عوامل چروکیدگی، سائیدگی و کماتش در مجموعه قالب بدون اعمال تغذیه محوری حذف شده و قابلیت بالچ لوله تابعی از فشار، زمان و دمای شکل‌دهی در محدوده شکل‌پذیری آن می‌باشد. فرآیند شکل‌دهی داغ مربوط به آلیاژهایی با استحکام بالا می‌باشد. به‌طوری که شکل‌دهی این نوع از آلیاژها در فرآیند هیدروفورمینگ، تنها با استفاده از عملیات حرارتی، قابلیت شکل‌پذیری آن افزایش می‌یابد.



شکل ۳۲ منحنی تغذیه محوری بر پایه اسپیلاین



شکل ۳۳ مقادیر نازک شدگی در الگوهای تغذیه محوری اسپیلاین

(Spline7) با میزان نازک شدگی ۲/۵۸ درصد و نازک شدگی بیشینه در الگوی (Spline1) به مقدار ۶/۶۴ درصد ایجاد شده است.

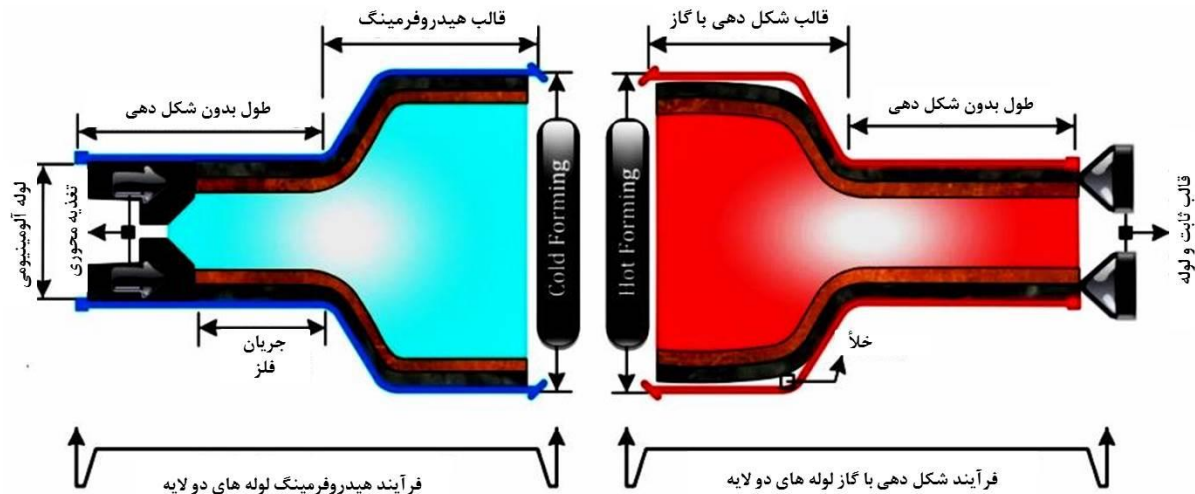
۳-۶- بررسی مقایسه‌ای شکل‌دهی سرد و داغ لوله‌های دولایه کامپوزیت بررسی میزان شکل‌پذیری در الگوهای بارگذاری (تغذیه محوری و فشار شکل‌دهی) مختلف در شکل‌دهی سرد توسط فرآیند هیدروفورمینگ نشان داد که بارگذاری خطی با میزان نازک شدگی ایده‌آل و پرشدگی کامل در بالچ قالب بسته شکل گرفته شده است. در نهایت مقایسه نمونه‌های سالم، حاصل از کار تجربی مطابق الگوی شکل ۳۰، تعیین نقطه بحرانی مرز پارگی و نمونه ایده‌آل با نمونه شبیه‌سازی پرداخته شده است. در شکل ۳۱ نمایی از بررسی توزیع ضخامت حاصل از کار تجربی و شبیه‌سازی فرآیند هیدروفورمینگ مطابق الگوی مسیر (T.A) تا (T.O) پرداخته شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی و تجربی نشان داد که ماکزیمم نازک شدگی در محدوده (Lc) اتفاق می‌افتد. به‌طوری که شروع پارگی از ناحیه ماکزیمم بالچ اولیه لوله در نقطه بحرانی (H) ایجاد می‌شود. ناحیه (La) در طول محدوده شکل‌دهی، از میزان نازک شدگی کمتری نسبت به (Lb) و (Lc) در پروفیل بالچ ایجاد شده است.

با بررسی میزان شکل‌پذیری لوله‌های دولایه مس-آلمینیوم در فرآیندهای شکل‌دهی هیدروفورمینگ نشان می‌دهد که رفتار شکل‌پذیری لوله‌های دولایه با اعمال بارگذاری محوری، پروفیل پرشدگی قالب در حد مطلوب می‌باشد. به‌طوری که در فرآیند شکل‌دهی داغ توسط دمش گاز، شکل‌پذیری لوله‌های دولایه بدون اعمال جابجایی محوری در تمامی نمونه‌ها ترکیب‌دهی مشاهده شده است. در شکل ۳۲ نمایی از شماتیک فرآیند شکل‌دهی سرد و داغ به‌صورت مقایسه نشان داده شده است. بررسی‌ها نشان داد که در شکل‌دهی با دمش گاز به دلیل عدم اعمال تغذیه محوری، میزان بالچ در لوله دولایه قبل از

۷- نتیجه‌گیری

مرحله‌ای و اسپیلاین) به کمک نرم‌افزار المان محدود آباکوس مورد مطالعه قرار گرفت. در نهایت در الگوی بارگذاری ایده‌آل برحسب میزان نازک شدگی در آزمایش‌های تجربی به تعیین مرز ترکیدگی و نمونه سالم پرداخته شد. در نهایت مقایسه‌ای در راستای شکل‌پذیری در فرآیند سرد و داغ شکل‌دهی لوله‌های دولایه به شرح زیر می‌باشد:

در این مقاله شکل‌دهی سرد و داغ لوله‌های دولایه فلزی مس-آلمینیوم توسط فرآیندهای هیدروفرمینگ و دمش گاز به بحث و بررسی پرداخته شد. به‌منظور دستیابی به هندسه بالچ قالب بسته و پروفیل شکل‌پذیری کامل لوله درون قالب در فرآیند شکل‌دهی سرد، الگوهای بارگذاری مختلف (خطی،



شکل ۳۲ بررسی مقایسه‌ای شکل‌دهی لوله‌های دولایه کامپوزیتی توسط فرآیند داغ (دمش با گاز) و سرد (هیدروفرمینگ).

به شرایط شکل‌دهی سرد در محدوده قبل از ترکیدگی قرار می‌گیرد.

➤ شرایط بارگذاری و اعمال تغذیه محوری مناسب، سبب بهبود شکل‌پذیری بدون ترکیدگی در فرآیند هیدروفرمینگ و پرشدگی بهتر گوشه‌ها شده است.

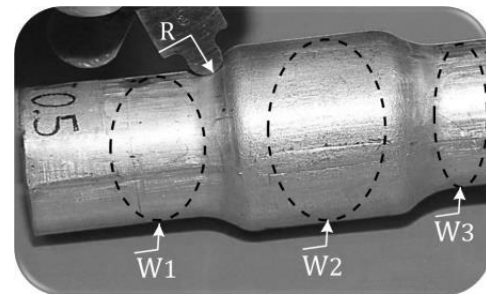
➤ به دلیل مقید بودن انتهای لوله و محدودیت‌های بالای استفاده از تغذیه محوری در فرآیند شکل‌دهی داغ لوله‌های دولایه، سبب عدم شکل‌پذیری کامل لوله در پروفیل قالب شده است.

➤ نتایج حاصل از شکل‌دهی لوله‌های دولایه مس-آلمینیوم نشان داد که با استفاده از بارگذاری خطی مناسب در فرآیند شکل‌دهی سرد می‌توان سبب بهبود میزان شکل‌پذیری و جلوگیری از ترکیدگی نسبت به حالت بدون تغذیه محوری در شکل‌دهی داغ دست‌یافت.

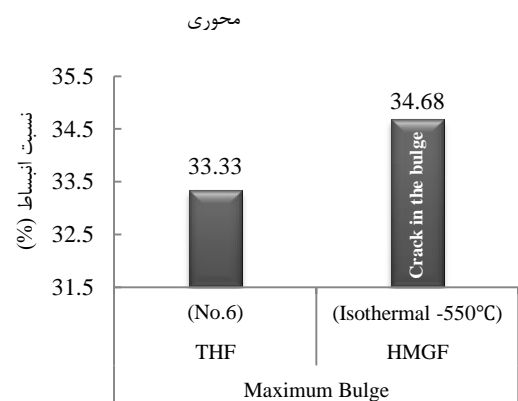
➤ بررسی مدل‌های بارگذاری مختلف در شکل‌دهی سرد، شکل‌پذیری مناسب در الگوی خطی در نمونه بالچ سالم و کامل لوله دولایه با میزان بیشترین نازک شدگی به میزان ۱/۶۵ میلی متر حاصل شده است.

➤ در شرایط هندسی و بارگذاری پژوهش حاضر، شکل‌پذیری نمونه سالم بالچ لوله در قالب هیدروفرمینگ در فشار شکل-دهی ۲۸۰ بار و تغذیه محوری ۶ میلی متر دارای مینیم میزان نازک شدگی لوله به مقدار ۸/۳۵ درصد می‌باشد.

➤ مرز ترکیدگی و نمونه سالم در الگوی بارگذاری خطی فرآیند هیدروفرمینگ، مطابق هندسه و جنس پژوهش حاضر، با فشار داخلی ۲۸۰ بار و تغذیه محوری ۵/۵ میلی متر مشاهده شد.



شکل ۳۳ نمایی از کیفیت سطح فرآیند هیدروفرمینگ با اعمال تغذیه محوری



شکل ۳۴ نسبت انبساط لوله دولایه در فرآیندهای شکل‌دهی (THF) و (HMGF)

➤ بررسی نسبت انبساط، در فرآیند هیدروفرمینگ و دمش گاز نشان می‌دهد فرآیند شکل‌دهی داغ لوله دولایه کامپوزیتی مس-آلمینیوم با میزان ۱/۳۵ درصد افزایش میزان بالچ نسبت

۸- مراجع

- tube hydroforming processes”, JCARME, Vol. 2, No. 2, pp. 10-20, 2013.
- [19] Shahbazi Karami. J., Malekzadeh. K., Payganeh. G., “Study of geometrical parameters on hydroforming of a new three-layered sandwich tube and finite element simulation”, International Conference on Mechanical, “Automotive and Materials Engineering (ICMAME’2012), Jan. 7-8, 2012.
- [20] Hwang. Y., Chen. W., “Analysis of tube hydroforming in a square cross sectional die, International Journal of Plasticity”, Vol. 21, No. 9, pp.10-20, 2005.
- [21] Moslemi Naeini. H., Liaghat. Gh., Hashemi Ghiri. S.J., Seyedkashi. S.M.H., “FE Simulation and Experimental Study of Tube Hydroforming Process for AA1050 Alloy at various temperatures”, Advanced Materials Research, Vol. 264-265, No. 5, pp. 96-101, 2011.
- [22] Liu. G., Wu. Y., Wang. D., Yuan. S., “Effect of feeding length on deforming behavior of Ti-3Al-2.5 V tubular components prepared by tube gas forming at elevated temperature”, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 81, No. 9, pp.10-20, 2015.
- [23] Michieletto. F., Ghiotti. A., Bruschi. S., “Novel experimental set-up to test tubes formability at elevated temperatures”, Key Engineering Materials, Vols 611-612, No. 6, pp. 62-69, 2014.
- [1] Islam. M.D., Olabi. A.G., Hashmi. M.S.J., “Feasibility of multi-layered tubular components forming by hydroforming and finite element simulation”, Journal of Materials Processing Technology Vol. 2, No. 3, pp.174, 394-398.2006.
- [2] Seyedkashi. S.M.H., Liaghat. Gh., Moslemi Naeini. H., Mahdavian S.M., Gollo M.H., “Numerical and experimental study of two-layered tube forming by hydroforming process”, Advanced Materials Research, Vol. 2, No. 1, pp. 264-265, 2011.
- [3] Harjinder. S., “Fundamentals of Hydroforming, Society of Manufacturing Engineers”, 2003.
- [4] Alaswad. A., Benyounis. K.Y., Olabi. A.G., “Finite element comparison of single and bi-layered tube hydroforming processes”, Materials & Design, Vol. 32, No. 2, pp.10-20, 2011.
- [5] Hashmi. M.S.J., Islam. M.D., Olabi. A. G., “Experimental and finite element simulation of formability and failures in multilayered tubular components”, of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, Vol. 24, No. 1, pp.1-10, 2007.
- [6] Alaswad. A., Benyounis. K.Y., Olabi. A.G., “Employment of finite element analysis and Response Surface Methodology to investigate the geometrical factors in T-type bi-layered tube hydroforming”, Advances in Engineering Software, Vol. 42, No. 11, pp. 917-926, 2011.
- [7] Yi. H. K., Pavlina. E. J., Van Tyne. C. J., Moon. Y. H., “Application of a combined heating system for the warm hydroforming of lightweight alloy tubes”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 203, No. 1-3, pp. 532-536, 2008.
- [8] Ze-jun. T., Gang. L., Zhu-bin. H., Shi-jian. Y., “Wrinkling behavior of magnesium alloy tube in warm hydroforming”, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Vol. 20, No. 7, pp. 1288-1293, 2010.
- [9] Hwang. Y.M. , Su. Y.H. and Chen. B.J., “Tube Hydroforming of Magnesium Alloys at Elevated Temperatures”, Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 132, No.3, pp. 031012, 2010.
- [10] Hashemi. S. Moslemi Naeini. J., H., Liaghat. Gh., Shahbazi Karami J., Roohi. A. H., “Prediction of Bursting in Warm Tube Hydroforming using Modified Ductile Fracture Criteria”, In Persian, Modares Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 16, pp. 201-211, 2015.
- [11] Hosseinipour. S. J., Kargar Pishbijari. H., Shahbazi-Karami. J., “Experimental comparison of the formability of single-layer aluminum tubes and twolayer copper-aluminum tubes in the hot gas blow forming process”, In Persian, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 2, No. 4, pp. 36-46, 2016.
- [12] Parto D. M.; Seyedkashi, S. M. H.; Liaghat, Gh.; Naeini, H. Moslemi; Panahizadeh R. V., “Investigation of aluminum-copper tube hydroforming with axial feeding”, SOURCE AIP Conference Proceedings, Vol. 1315, No.1, pp. 475-480. 2011.
- [13] Loh-Mousavi. M., Mirhosseini. A. M., Amirian. G., “Investigation of Modified Bi-Layered Tube Hydroforming by Pulsating Pressure”, Key Engineering Materials”, Vol. 486, No. 5, pp. 5-8, 2011.
- [14] Seyedkashi. S.M.H., Liaghat. Gh., Moslemi Naeini. H., “Numerical and Experimental Study of Two-Layered Tube Forming by Hydroforming Process”, Advanced Materials Research ,Vol. 264-265, No. 1, pp. 102-107, 2011.
- [15] Alaswad. A., Benyounis. K.Y., Olabi. A.G. , “Finite element comparison of single and bi-layered tube hydroforming processes”, Materials & Design, Vol. 32, No. 2, pp. 1-10, 2011.
- [16] Islam. M.D., Olabi. A.G., Hashmi. M.S.J., “Feasibility of multi-layered tubular components forming by hydroforming and finite element simulation”, Journal of Materials Processing Technology,, Volume 174, Issues 1-3, 2006.
- [17] Islam. M.D., Olabi. A.G., Hashmi. M.S.J., “Mechanical stresses in the multilayered T-branch hydroforming: numerical simulation”, Int. J. Manufacturing Technology and Management, Vol. 15, No. 2, pp. 10-20, 2008.
- [18] Payganeh. Gh., Shahbazi Karami. J., Malekzadeh Fard. K., “Finite element comparison of single, bi-layered and three-layered

