

اثر اصطکاک بر جابه‌جایی خط جوش و توزیع ضخامت در فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی ورق‌های ترکیبی

عماد رحیمی^۱ و حسن مسلمی نائینی^۲ رسول صفدریان^۳ امیر حسین روحی^۴
 دانشکده فنی و مهندسی گروه مهندسی مکانیک دانشکده فنی و مهندسی
 دانشگاه تربیت مدرس دانشگاه صنعتی خاتم‌الانبیاء بهبهان دانشگاه تربیت مدرس
 (تاریخ دریافت: ۹۰/۱۲/۲۱؛ تاریخ پذیرش: ۹۱/۰۹/۱۲)

چکیده

استفاده از لوح‌های ترکیبی در تولید، دارای مزایای فراوانی از قبیل کاهش وزن و هزینه تولید محصولات است. این مزایا سبب شده که لوح‌های ترکیبی به سرعت در صنایع هوافضا و خودروسازی مورد توجه قرار گیرند. اما به‌کارگیری این لوح‌ها در صنعت نیازمند استفاده از روش‌هایی برای چیره شدن بر مشکل کاهش شکل‌پذیری این لوح‌ها نسبت به مواد پایه آنهاست. یکی از این روش‌ها، به‌کارگیری فشار سیال در شکل‌دهی ورقی است. در این تحقیق، فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی لوح‌های ترکیبی به وسیله روش اجزاء محدود و صحت‌سنجی تجربی مطالعه شده و اثر اصطکاک بین ورق و اجزای قالب بر میزان جابه‌جایی خط جوش و توزیع ضخامت لوح‌هایی از جنس فولادی کم‌کربن با ضخامت‌های متفاوت بررسی شده است. نتایج عددی به دست‌آمده با نتایج تجربی مطابقت خوبی دارند. این نتایج نشان می‌دهد که با طراحی شرایط اصطکاکی مناسب، امکان کنترل توزیع ضخامت و جابه‌جایی خط جوش در این فرآیند وجود دارد، تا جایی که حذف جابه‌جایی خط جوش در کف فنجان ایجاد شده دست‌یافتنی است.

واژه‌های کلیدی: لوح ترکیبی (TWB)، کشش عمیق هیدرومکانیکی، ضریب اصطکاک، جابجایی خط جوش، توزیع ضخامت

Effect of Friction on Weld-Line Movement and Thickness Distribution in Hydro-Mechanical Deep Drawing of Tailor-Welded Blanks (TWBs)

E. Rahimi and H. Moslemi-Naeini

Faculty of Eng. and Tech.
Tarbiat Modares Univ.

R. Safdarian

Mech. Eng. Dep't
Behbahan Khatam Alanbia Univ. of Tech.

A.H. Roohi

Faculty of Eng. and Tech.
Tarbiat Modares Univ.

(Received: 12 March, 2012; Accepted: 27 February, 2013)

ABSTRACT

Use of Tailor-Welded Blanks (TWBs) in production has significant advantages such as weight and cost reduction. These benefits cause TWBs to be considered in aerospace and automotive industry. However, their application requires processes that increase their poor formability in comparison with base materials. One of these procedures is the use of fluid pressure in sheet metal forming. In this paper hydro-mechanical deep drawing process of tailor-welded low carbon steel blanks with different thicknesses is studied using FEM and verified experimentally and effect of friction between blank and tooling elements on weld-line movement and thickness distribution is investigated. Results of FEM are in good agreement with experiments. Results show that it is possible to control thickness distribution and weld-line movement by proper design of friction condition inasmuch as elimination of weld-line movement in bottom of the produced cup.

Keywords: Tailor-Welded Blank (TWB), Hydro-Mechanical Deep Drawing, Friction Coefficient, Weld-Line Movement, Thickness Distribution

۱- کارشناس ارشد: rahimiemad@yahoo.com

۲- استاد (نویسنده پاسخگو): moslemi@modares.ac.ir

۳- استادیار: safdarian_rasool@yahoo.com

۴- دانشجوی دکتری: amir.roohi@yahoo.com

۱- مقدمه

استفاده از لوح‌های ترکیبی (TWB) در تولید به منظور کاهش وزن محصول، کاهش دورریز و هزینه‌های مواد، افزایش انعطاف‌پذیری در طراحی و همچنین فراهم شدن امکان استفاده از مزایای فرآیندهای جوشکاری پیوسته، کاربرد روزافزونی یافته است. مسئله مهم در شکل‌دهی این لوح‌ها، کاهش شکل‌پذیری لوح‌های ترکیبی نسبت به ورق‌های پایه است. کاهش شکل‌پذیری لوح‌های ترکیبی نسبت به لوح‌های پایه آنها، به خواص ناحیه جوش و ناحیه متأثر از حرارت و تغییر شکل ناهمگون بخش‌های مختلف لوح مربوط می‌شود [۱]. شکل‌دهی لوح‌های ترکیبی به علت شکل‌پذیری کم این لوح‌ها، دشوار است.

تحقیقات متعددی در زمینه به‌کارگیری روش‌هایی به منظور افزایش شکل‌پذیری لوح‌های ترکیبی انجام شده است. در تحقیق احمدقلو و همکاران [۲] برای افزایش شکل‌پذیری لوح‌های ترکیبی و با هدف اعمال فشار متفاوت بر دو نیمه لوح، یک روش کنترل فشار برای ورق‌گیر پیشنهاد شده است. در این روش، از یک سیستم سیلندر نیتروژنی که شامل ۶ سیلندر نیتروژن و دو تانک می‌باشد استفاده شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که چرخش خط جوش در حین شکل‌دهی با استفاده از نیروی ورق‌گیر متفاوت قابل کنترل است. با کنترل موقعیت خط جوش امکان کاهش سطح کرنش روی نیمه لوح که دارای ضخامت یا استحکام کمتر است، وجود دارد. در تحقیقی که توسط کینسی^۱ و همکاران [۳] انجام شده، از یک سیستم مهارکننده هیدرولیکی برای کنترل حرکت خط جوش لوح‌های ترکیبی استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی‌های این تحقیق، کاهش بیشینه کرنش‌ها در راستای خط جوش تا یک-پنجم را گزارش می‌کنند. جیانگ^۲ و همکاران [۴] در تحقیقی، روش شکل‌دهی چند مرحله‌ای را به عنوان یک راهکار برای افزایش خاصیت شکل‌پذیری لوح‌های ترکیبی پیشنهاد کرده‌اند. در نتایج این تحقیق که بر روی یک قطعه صنعتی انجام شده است، مشاهده می‌شود که در این فرآیند، تغییر مسیر کرنش برای کاهش پیک‌های کرنش مفید خواهد بود. در تحقیق دیگری که توسط چنا^۳ و همکاران [۵] انجام شده، تأثیر استفاده از ورق‌گیر پله‌دار و پین‌های نگه‌دارنده خط جوش بر شکل‌پذیری لوح‌های ترکیبی با استفاده از شبیه‌سازی و آزمایش‌های تجربی کشش یک جعبه مورد

بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق گزارش می‌شود که استفاده از ورق‌گیر پله‌دار به کاهش پدیده چین‌خوردگی کمک کرده و استفاده همزمان از ورق‌گیر پله‌دار و پین‌های نگه‌دارنده، بهترین اثر را در بهبود شکل‌پذیری محصول داشته است. پادمانابهان^۴ و همکاران [۶] با استفاده از شبیه‌سازی‌های المان محدود اثر استفاده از ورق‌گیر چندتکه را در شکل‌دهی لوح‌های ترکیبی آلومینیوم- فولاد، مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهند که ورق‌گیر چندتکه امکان اعمال مناسب نیروهای ورق‌گیری مختلف را بر دو بخش لوح‌ها فراهم کرده که به افزایش قابلیت شکل‌پذیری این لوح‌های ترکیبی می‌انجامد.

از آنجایی که فرآیند شکل‌دهی هیدرومکانیکی به عنوان یک فرآیند تولیدی با کاربرد روزافزون برای دست‌یابی به نسبت‌های کشش بالاتر، امکان تولید قطعات پیچیده‌تر و همچنین توزیع یکنواخت‌تر ضخامت نسبت به فرآیند کشش عمیق متداول مطرح است، استفاده از این فرآیند به منظور افزایش شکل‌پذیری لوح‌های ترکیبی مورد توجه قرار می‌گیرد. تحقیقات اندکی در زمینه استفاده از روش‌های هیدروفورمینگ در شکل‌دهی ورق‌های ترکیبی گزارش شده است. مثال‌هایی از این تحقیقات شامل تحقیق کومار پاندا^۵ و راوی کومار^۶ [۱] است که با استفاده از شبیه‌سازی و آزمایش، به بررسی اثر فشار محیطی سیال و استفاده از روانکار بر شکل‌پذیری ورق‌های ترکیبی تشکیل شده از دو فولاد متفاوت در شکل‌دهی کششی دومحوره پرداخته‌اند. در این تحقیق که با استفاده از سنبه نیم‌کروی و با نیروی ورق‌گیری سنتی انجام شده، حد ارتفاع گنبد و توزیع کرنش بررسی و جابه‌جایی خط جوش در دو حالت کلی مقایسه شده و در نهایت، افزایش شکل‌پذیری با استفاده از فشار محیطی سیال و همچنین با به‌کارگیری روانکار نسبت به شکل‌دهی کششی دومحوره متداول گزارش شده است. قراخانی [۷] و همچنین پاشیره پور [۸] در تحقیقات خود با استفاده از شبیه‌سازی، شکل‌دهی ورق‌های ترکیبی با سنبه مربعی شکل را توسط روش هیدروفورمینگ مورد بررسی قرار داده‌اند. در تحقیقات آنها مزایای روش هیدروفورمینگ نسبت به کشش عمیق متداول از قبیل یکنواختی کشش و امکان دسترسی به عمق کشش‌های بیشتر و کاهش جابه‌جایی خط جوش مشهود است.

این مطالعه با هدف بررسی اثر اصطکاک بین ورق و اجزای قالب در شکل‌دهی هیدرومکانیکی یک قطعه استوانه‌ای از

4- Padmanabhan

5- Kumar Panda

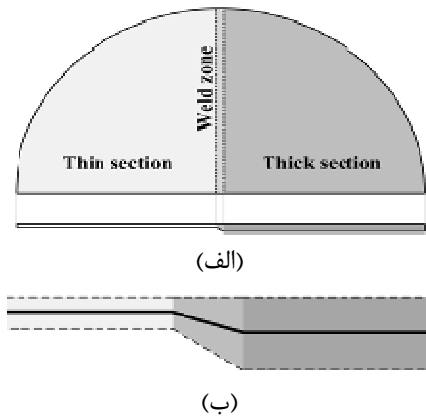
6- Ravi Kumar

1- Kinsey

2- Jiang

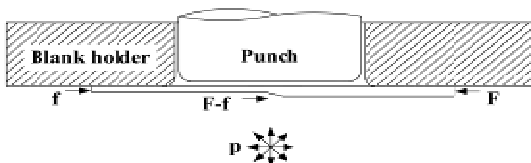
3- Chena

می‌شود بین ۱ تا ۲ میلی‌متر گزارش شده است. با توجه به این اطلاعات و مشاهدات تجربی، ناحیه خط جوش به عرض ۱/۵ میلی‌متر و به صورت شیب‌دار در نظر گرفته شده است. شکل ۲-ب، الگوی استفاده شده جهت شبیه‌سازی خط جوش را نمایش می‌دهد. برای شبیه‌سازی این الگو با المان‌های پوسته‌ای، همدسه پوسته میانی لوح ترسیم و ضخامت هر بخش در دو طرف آن اعمال شده است. ضخامت در ناحیه جوش لوح به عنوان تابعی از مختصات وارد شده است.



شکل (۲): (الف) بخش‌های مختلف لوح ترکیبی و (ب) الگوی شبیه‌سازی خط جوش.

لوح ترکیبی به نحوی طراحی شده که اختلاف ضخامت دو بخش لوح در یک طرف بوده و یک سطح صاف در طرف دیگر وجود داشته باشد (شکل ۲-ب). جوشکاری لوح با وجود سطح صاف در یک طرف ساده‌تر است، همچنین می‌توان با قرار دادن سطح صاف لوح در زیر ورق گیر از نشت سیال به پشت ورق در کار تجربی جلوگیری کرد. از طرف دیگر، وجود نیروهای شعاعی متفاوت در دو لبه ورق می‌تواند سبب حرکت افقی لوح در راستای عمود بر خط جوش، قبل از نفوذ سنبه شود که قرار دادن تمامی اختلاف ضخامت در سطحی که فشار سیال بر آن اعمال می‌شود این مشکل را نیز برطرف می‌کند. شکل ۳ نحوه به تعادل رسیدن این نیروها را در الگوی انتخاب‌شده نمایش می‌دهد.

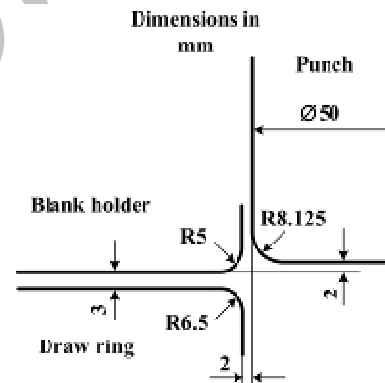


شکل (۳): الگوی قرارگیری لوح و نحوه به تعادل رسیدن نیروهای وارده به ورق از جانب سیال در راستای عمود بر خط جوش در صفحه افقی.

ورق‌های ترکیبی با در نظر گرفتن فشار شعاعی در شبیه‌سازی‌ها انجام گرفته است. از آنجایی که محل خط جوش در قطعه نهایی و همچنین توزیع ضخامت، علاوه بر این که هندسه و کارایی محصول را تحت تأثیر قرار می‌دهند، می‌توانند به عنوان نمادهایی در میزان شکل‌پذیری هم مطرح شوند، بنابراین این دو عامل به عنوان شاخص مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

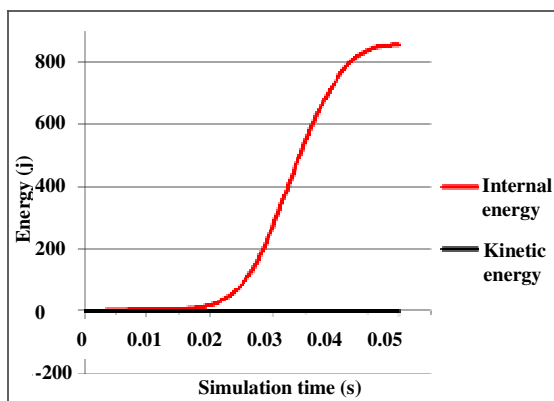
۲- شبیه‌سازی

شبیه‌سازی این فرآیند در نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس ۶/۹-۱ انجام شده و از روش حل صریح^۱ نرم‌افزار برای تحلیل فرآیند استفاده شده است. همدسه محصول نهایی به صورت یک فنجان استوانه‌ای شکل به قطر ۵۰ میلی‌متر و با ۱۰ میلی‌متر فلنج باقیمانده در نظر گرفته شده است. به منظور بررسی جابه‌جایی خط جوش و توزیع ضخامت در ناحیه فلنج، قطعه تا انتها کشیده نشده و شامل ناحیه فلنج است. شکل ۱ ابعاد قالب استفاده شده در شبیه‌سازی‌های اصلی را نمایش می‌دهد.

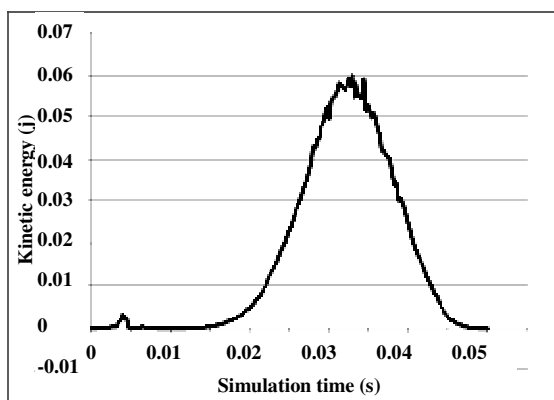


شکل (۱): همدسه و ابعاد قالب استفاده شده در شبیه‌سازی‌ها.

با توجه به تقارن موجود، نیمی از لوح ترکیبی دایره‌ای شکل شبیه‌سازی شده است. این نیم‌دایره از لوح ترکیبی به دو بخش با ضخامت‌های متفاوت (۱/۵ و ۱ میلی‌متر در شبیه‌سازی‌های اصلی) و یک بخش به عنوان ناحیه خط جوش تقسیم‌بندی شده است (شکل ۲-الف). قطر لوح ترکیبی در شبیه‌سازی‌های اصلی به گونه‌ای انتخاب شد که نسبت کشش ۲/۲۵ را نتیجه دهد. در مطالعات انجام شده [۹ و ۱۰] با بررسی میزان سختی و مشاهدات میکروسکوپی، عرض ناحیه خط جوش در فرآیند جوشکاری لیزر (Nd:YAG و CO₂) برای جنس و ضخامت‌های مشابه آنچه در این تحقیق بررسی

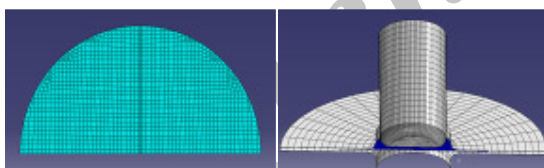


(الف)



(ب)

شکل (۴): (الف) تاریخچه انرژی‌های جنبشی و داخلی فرآیند در زمان شبیه‌سازی ۰/۰۵ ثانیه و (ب) تاریخچه انرژی جنبشی فرآیند در زمان شبیه‌سازی ۰/۰۵ ثانیه.



(ب)

(الف)

شکل (۵): (الف) مدلی از اجزای قالب شبیه‌سازی شده و (ب) مدلی از لوح ترکیبی شبیه‌سازی شده.

با توجه به تأثیرپذیری نمودار حد شکل‌دادن^۱ از فشار هیدروستاتیک [۱۳] برای پیش‌بینی شکست در شبیه‌سازی‌های انجام شده، بیشینه نازک‌شدگی متناظر با شکست بر اساس نمودار حد شکل‌دادن بدون وجود فشار هیدروستاتیک از شبیه‌سازی‌ها به دست آمده و برای فشارهای بالای سیال به کار برده شده است. این مقدار برابر با ۳۰٪ نازک‌شدگی است.

ورق در شبیه‌سازی‌ها به صورت جسم تغییر شکل‌پذیر و اجزای قالب به صورت جسم صلب مدل شده است. با توجه به پایین‌تر بودن زمان محاسبات در المان‌های پوسته‌ای به نسبت المان‌های حجمی و همچنین وجود قابلیت بررسی توزیع ضخامت به عنوان یک خروجی اولیه برای این نوع المان‌ها، در شبیه‌سازی ورق از المان‌های پوسته‌ای مربعی S4R استفاده شده است. این نوع المان از دسته المان‌های با کاربرد عمومی برای مسائل شکل‌دهی فلزات است. اندازه المان‌ها و همچنین زمان فرآیند با استفاده از شبیه‌سازی‌های متعدد و بررسی تاریخچه انرژی‌ها و روند تغییرات تنش و کرنش در مراحل مختلف به ترتیب ۲ میلی‌متر و ۰/۰۵ ثانیه انتخاب شده است. زمان فرآیند به نحوی انتخاب شده که شرط شبه‌استاتیک بودن در شبیه‌سازی‌ها برقرار باشد. برای بررسی شرط شبه‌استاتیک بودن در راهنمای نرم‌افزار دو معیار پیشنهاد شده است: اول اینکه انرژی جنبشی در طول فرآیند کمتر از پنج درصد انرژی تغییر شکل باشد، دوم اینکه نمودار تغییرات انرژی جنبشی در طول فرآیند دارای نوسانات محدود باشد [۱۱]. شکل ۴ برقرار بودن شرط اول و دوم شبه‌استاتیک بودن شبیه‌سازی‌ها را نمایش می‌دهد. همچنین در شکل ۵، نمایی از مدل‌سازی و المان‌بندی ورق و اجزای قالب نشان داده شده است.

در بررسی تحلیلی و تجربی خواص بخش‌های مختلف ورق ترکیبی تولید شده توسط جوش لیزر، مقدار توان کارسختی در فلز جوش کمتر از فلزهای پایه و مقدار ضریب استحکام در آن بیشتر از این ضریب در فلزهای پایه گزارش شده است. به طور کلی، سطح نمودار تنش-کرنش فلز جوش بالاتر از فلزهای پایه ترسیم شده است [۹] و این به معنی استحکام بالاتر در فلز جوش ورق ترکیبی است. در نتیجه دور از انتظار نیست که تفاوت زیادی در استحکام کششی کل ورق ترکیبی با ورق‌های پایه (به علت وقوع پارگی در ورق نازک‌تر و نه در خط جوش) مشاهده نشود [۱۲]. از طرف دیگر هرچند نسبت حجم مارتنزیت در جوش لیزر به علت بالا بودن نرخ سرد شدن زیاد است [۱۰] و در نتیجه کرنش نهایی ناحیه جوش کمتر از فلزهای پایه است، ولی با توجه به عرض کم ناحیه جوش به نسبت قطر بلانک می‌توان این اثر را نادیده گرفت. در نتیجه در این تحقیق، با فرض استفاده از فرآیند جوشکاری لیزر با کیفیت بالا برای اتصال دو قسمت ورق ترکیبی و با نادیده گرفتن عیوب جوشکاری در خط جوش از خواص متفاوت ناحیه جوش صرف‌نظر شده است.

به لبه ورق می‌شود. بررسی‌های صورت گرفته [۱۹] نشان می‌دهد که این نیروی شعاعی برای ورق‌های ساده، اثری مشابه اثر کاهش اصطکاک بین ورق و ورق‌گیر دارد که با تعیین ضریب اصطکاک معادل بین ورق و ورق‌گیر، می‌توان از این اثر چشم‌پوشی کرد. با توجه به ضخامت‌های متفاوت ورق‌های ترکیبی مورد استفاده در این تحقیق و در نتیجه نیروهای شعاعی متفاوتی که به دو بخش این ورق‌ها وارد می‌شود، اعمال اثر این نیروها مورد توجه قرار گرفته است.

از آنجایی که امکان اعمال فشار به لبه‌های پوسته‌ای در نرم‌افزار مورد استفاده وجود ندارد، اثر فشارهای شعاعی به نیروهای گسترده خطی تبدیل شده و به عنوان نیروهای لبه‌ای در مدل‌سازی وارد شده است.

نیروهای ناشی از فشار شعاعی شامل دو بخش است که به شرح زیر می‌باشد:

$$F = pL(T+\Delta T), \quad (1)$$

$$f = pL(t+\Delta t), \quad (2)$$

که در آن، p فشار سیال درون محفظه در هر لحظه، L طول لبه هر بخش از ورق، F و f به ترتیب نیروهای شعاعی وارد بر بخش ضخیم‌تر و نازک‌تر و T و t به ترتیب ضخامت‌های بیشتر و کمتر ورق ترکیبی هستند. همچنین ΔT و Δt تغییرات ضخامت بخش‌های ضخیم‌تر و نازک‌تر در طول فرآیند نسبت به ضخامت‌های اولیه همان بخش هستند. با فرض برابر بودن تغییرات ضخامت دو بخش ورق در ناحیه فلنج ($\Delta T = \Delta t$)، می‌توان با استفاده از ضریب اصطکاک معادل از اثر $pL\Delta T$ و $pL\Delta t$ چشم‌پوشی کرد، در نتیجه با تعریف $Q = pT$ و $q = pt$ خواهیم داشت:

$$F = QL, \quad (3)$$

$$f = qL. \quad (4)$$

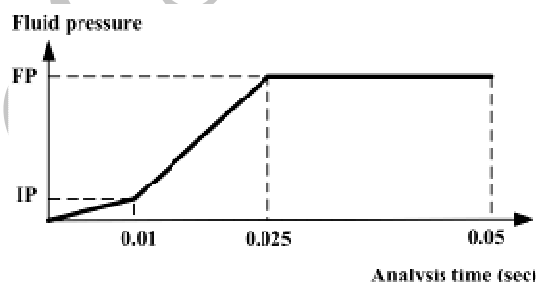
در نرم‌افزار مورد استفاده، Q و q به لبه بخش مربوط اعمال شده‌اند.

۳- آزمایش‌های تجربی

ارزیابی شبیه‌سازی‌ها و اطمینان از درستی نتایج حاصل از آنها نیازمند انجام بررسی‌های تجربی و به دست‌آوردن داده‌های تجربی برای مقایسه با نتایج عددی است. با توجه به وجود محدودیت ضخامت ورق در دستگاه جوش لیزر استفاده شده، در آزمایش‌های تجربی از ورق‌هایی با ضخامت کمتر استفاده شده است. به منظور صحت‌سنجی نتایج، شبیه‌سازی‌های جدیدی با ابعاد قالب موجود و لوح‌های استفاده شده در آزمایش‌های تجربی و با خواص مکانیکی حاصل از آزمون

در تحقیق حاضر، اصطکاک به صورت مدل اصطکاک کولمب تعریف شده است. با توجه به این‌که ضریب اصطکاک برای جنس ورق و قالب مورد استفاده در کمترین مقدار (روانکاری کامل) ۰/۰۲۹ و در بیشترین مقدار (تماس خشک) ۰/۴۲ پیشنهاد شده است [۱۴]. بنابراین برای بررسی اثر ضرایب اصطکاک، در این بازه، مقادیر هر یک به طور جداگانه تغییر داده شده است. با توجه به اطلاعات شبیه‌سازی‌های صحت‌سنجی شده مشابه [۱۵]، مقدار پیش‌فرض ضریب اصطکاک در سطوح تماس ورق با ورق‌گیر و قالب ۰/۰۵ و در سطح تماس ورق با سنبه ۰/۱ در نظر گرفته شده است. از این محدوده ضرایب اصطکاک در پژوهش‌های هیدروفورمینگ دیگری [۱۶ و ۱۷] نیز استفاده شده است.

تأثیر فشار سیال در فرآیند توسط اعمال فشار با توزیع یکنواخت در سطح ورق شبیه‌سازی شده است. شکل ۶ نمودار تغییرات فشار محفظه سیال در طول فرآیند را نشان می‌دهد.



شکل (۶): نمودار تغییرات فشار محفظه نسبت به زمان شبیه‌سازی.

مقدار فشار اولیه سیال با استفاده از روابط پیشنهادی موجود [۱۸]، که بر اساس نیروی لازم برای جدا نشدن ورق از ورق‌گیر در تماس اولیه سنبه با ورق آشکار شده بوده، در شبیه‌سازی‌های اصلی ۵ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. مقدار فشار نهایی سیال نیز در این شبیه‌سازی‌ها ۲۰ مگاپاسکال انتخاب شده است.

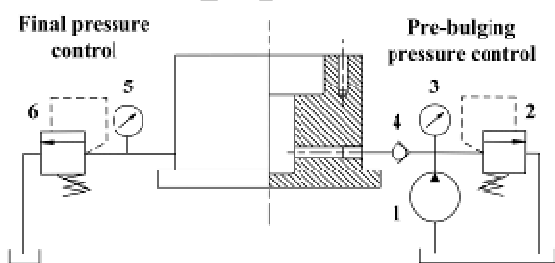
در این مطالعه، از نیروی ورق‌گیری نرم استفاده شده است. در این روش فشار سیال در ناحیه فلنج نیز اعمال شده و ورق را به سطح ورق‌گیر می‌فشارد. از مزایای این روش، عدم نیاز به ساخت ورق‌گیرهای دوتکه مختلف برای نسبت‌های ضخامت مختلف در آزمایش‌های تجربی (با قرار دادن سطح صاف لوح در زیر ورق‌گیر) است. به سبب استفاده از نیروی ورق‌گیری نرم در این فرآیند، فشار سیال موجود در ناحیه فلنج موجب اعمال نیروی شعاعی

قطعاتی تحت عنوان فیکسچر- فاصله‌انداز (شکل ۸) طراحی و توسط برش لیزر ساخته شدند. فیکسچر- فاصله‌انداز داخل قالب و بین ورق گیر و رینگ کشش قرار داده شده (فاصله‌اندازی) و به وسیله سطح خارجی شاخک‌ها، درون حفره قالب تثبیت می‌شوند. این قطعات با قطر داخلی متفاوت (برای نسبت‌های کشش مختلف) ساخته شده و توسط سطوح داخلی سه شاخک، لوح‌های دایره‌ای را موقعیت‌دهی می‌کنند.



شکل (۸): فیکسچر- فاصله‌اندازهای ساخته شده برای نسبت‌های کشش مختلف.

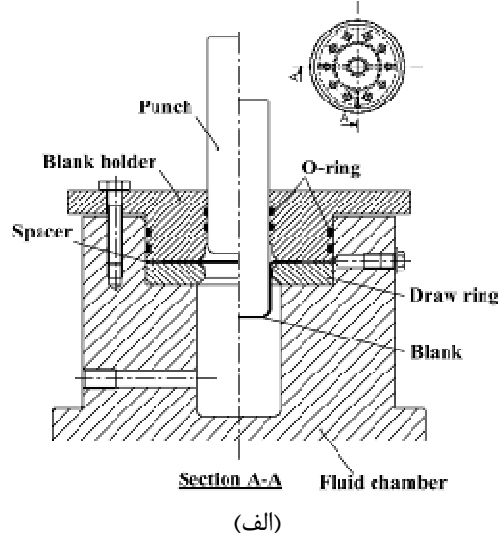
برای کنترل فشار روغن در مراحل مختلف فرآیند، از یک مدار کنترل هیدرولیکی مطابق شکل ۹ استفاده شده است. در مرحله پیش‌بالجینگ روغن به کمک پمپ ۱ به محفظه وارد شده، فشار داخل محفظه افزایش یافته و ورق به سمت سنبه که در موقعیتی بالاتر از سطح اولیه ورق ثابت است بالچ می‌شود. فشار در این مرحله با شیر کنترل فشار ۲ تنظیم می‌شود. در مرحله شکل‌گیری ورق به کمک سنبه، با حرکت سنبه به داخل محفظه، فشار روغن به شدت افزایش می‌یابد. شیر یک‌طرفه ۴ مانع از برگشت روغن و تخلیه آن از طریق واحد پیش‌بالجینگ می‌شود. حداکثر فشار سیال داخل محفظه در حین فرآیند با استفاده از شیر کنترل فشار نهایی ۶ تنظیم می‌شود. پس از رسیدن فشار به حد نهایی تعیین شده، عملیات در فشار ثابت ادامه می‌یابد.



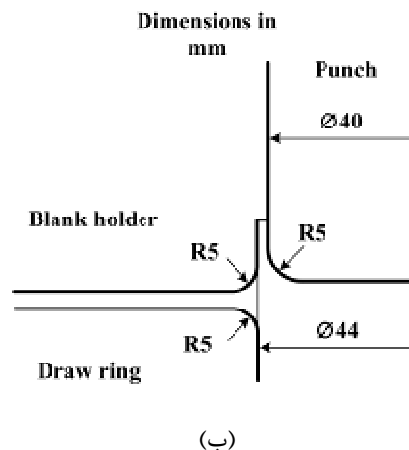
شکل (۹): مدار هیدرولیکی کنترل فشار محفظه‌ی سیال
 ۱- پمپ هیدرولیک، ۲- شیر کنترل فشار پیش‌بالجینگ،
 ۳- فشار سنج برای اندازه‌گیری فشار پیش‌بالجینگ،
 ۴- شیر یک‌طرفه، ۵- فشار سنج برای اندازه‌گیری فشار نهایی و ۶- شیر کنترل فشار نهایی محفظه.

کشش تک محوره انجام شده است. آزمایش‌های تجربی به طور عمده برای بررسی جابه‌جایی خط جوش و توزیع ضخامت محصول و با هدف مقایسه با نتایج شبیه‌سازی‌ها انجام شده‌اند.

آزمایش‌ها با کمک یک دستگاه پرس هیدرولیکی ۱۰۰ تن انجام شده است. همچنین سیال مورد استفاده روغن بوده و از مدار کنترل هیدرولیکی برای کنترل فشار سیال در حین فرآیند استفاده شده است. اجزای اصلی قالب کشش عمیق هیدرومکانیکی شامل سنبه، رینگ کشش، محفظه سیال و ورق‌گیر می‌باشند. مشخصات این قالب که جهت کشش قطعات استوانه‌ای طراحی شده در شکل ۷ نشان داده شده است [۲۰].



(الف)



(ب)

شکل (۷): مشخصات قالب استفاده شده در آزمایش‌های تجربی: (الف) اجزای قالب [۲۰] و (ب) ابعاد قالب.

از آنجایی که برای اندازه‌گیری میزان جابه‌جایی خط جوش لازم است در هنگام شکل‌دهی، سنبه درست در وسط لوح فرود آید،



شکل (۱۱): وقوع پارگی در بخش نازک‌تر نمونه‌های آزمون کشش تک محوره با جوش عرضی.

آزمایش‌های کشش عمیق هیدرومکانیکی لوح‌های ترکیبی با هدف بررسی میزان جابه‌جایی خط جوش و توزیع ضخامت محصول برای چند نسبت کشش و در فشارهای نهایی مختلف انجام شدند. پارامترهای این آزمایش‌ها، بر پایه نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های انجام‌شده بر اساس مشخصات مواد و قالب آزمایش‌ها انتخاب شدند. شکل‌های ۱۲ و ۱۳ به ترتیب مجموعه تجهیزات استفاده شده در آزمایش‌های تجربی و انواع پارگی در قطعات در حین شکل‌دهی هیدرومکانیکی را نشان می‌دهند.



شکل (۱۲): تجهیزات استفاده شده در آزمایش‌های تجربی.

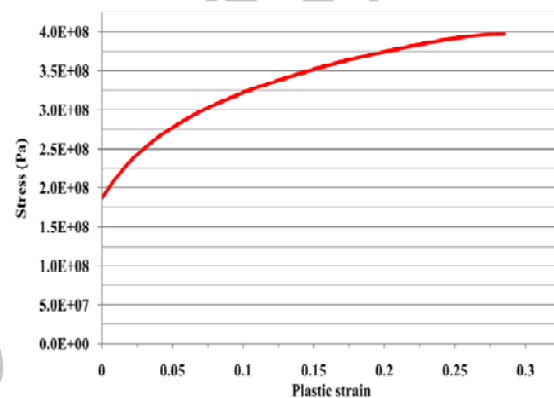


شکل (۱۳): انواع پارگی در شکل‌دهی هیدرومکانیکی لوح‌های ترکیبی: الف) دیواره و شعاع سر سنبه در بخش نازک‌تر لوح، ب) دیواره و شعاع رینگ کشش در بخش نازک‌تر لوح و ج) کف و ناحیه جوش.

شکل (۱۳): انواع پارگی در شکل‌دهی هیدرومکانیکی لوح‌های ترکیبی: الف) دیواره و شعاع سر سنبه در بخش نازک‌تر لوح، ب) دیواره و شعاع رینگ کشش در بخش نازک‌تر لوح و ج) کف و ناحیه جوش.

برای اندازه‌گیری جابه‌جایی خط جوش نمونه‌ها از دستگاه اندازه‌گیری CMM استفاده شده است (شکل ۱۴ و ۱۵). در این روش پس از مشخص شدن موقعیت خط جوش در فضا توسط ابر نقاط، مقدار جابه‌جایی خط جوش از موقعیت اولیه در جهت عمود بر خط جوش (در صفحه لوح اولیه) محاسبه و با نتایج

برای انجام آزمایش‌های کشش عمیق هیدرومکانیکی، ورق‌های فولاد کم‌کربن با نام St12 و با ضخامت‌های ۰/۵۱۵ و ۰/۷۰۵ میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مقایسه نتایج شبیه‌سازی‌ها و آزمایش‌های تجربی برای ارزیابی درستی نتایج ارائه شده نیازمند استفاده از خواص ورق‌ها در شبیه‌سازی‌ها می‌باشد. بدین منظور از نتایج آزمون کشش تک محوری برای تعیین و محاسبه ویژگی‌های مورد نیاز ورق‌ها استفاده شده است. با استخراج منحنی تنش- کرنش مهندسی ورق از آزمون کشش تک محوری و تبدیل آن به منحنی تنش-کرنش حقیقی، تنش تسلیم ورق‌های تهیه شده ۱۸۷ مگاپاسکال و مدول یانگ آن‌ها ۱۷۰ گیگاپاسکال به دست آمده است. در شکل ۱۰ منحنی تنش-کرنش پلاستیک ورق‌ها ارائه شده است.



شکل (۱۰): منحنی تنش-کرنش پلاستیک به دست آمده از آزمون کشش تک محوره.

لوح‌های ترکیبی استفاده شده در آزمایش‌های تجربی در قطرهای مختلف (برای نسبت‌های کشش مختلف) از دو نیم‌دایره با ضخامت‌های ۰/۵۱۵ و ۰/۷۰۵ میلی‌متری تشکیل شده بودند. از آنجایی که کیفیت برش ورق‌ها، فاصله هوایی در محل جوش و در نتیجه کیفیت نهایی جوش را تحت تأثیر قرار می‌دهد و همچنین دقت اندازه‌گیری جابه‌جایی خط جوش به میزان دقت ابعادی و تقارن در لوح اولیه بستگی دارد، برای برش نیم‌دایره‌ها از فرآیند برش سیم^۱ استفاده شده است. برای اتصال دو بخش لوح ترکیبی دستگاه جوش، لیزر Nd:YAG با توان ۶۰ وات مورد استفاده قرار گرفته است. برای ارزیابی میزان استحکام جوش، نمونه‌هایی به شکل استاندارد آزمون کشش تک محوره با دو ضخامت ۰/۵۱۵ و ۰/۷۰۵ و با وجود جوش عرضی تهیه شده و تحت کشش قرار گرفته است. وقوع پارگی در بخش نازک‌تر قطعات (شکل ۱۱)، وجود استحکام لازم در ناحیه‌ی جوش را تأیید می‌کند.

برای ارزیابی میزان درستی نتایج شبیه‌سازی‌ها، دو قطعه که در نسبت‌های کشش و فشارهای نهایی متفاوت شکل داده شده‌اند مورد بررسی قرار گرفته‌اند. سایر شرایط شبیه‌سازی‌ها مشابه شبیه‌سازی‌های اصلی و با شرایط توضیح داده شده در بخش شبیه‌سازی‌ها است.

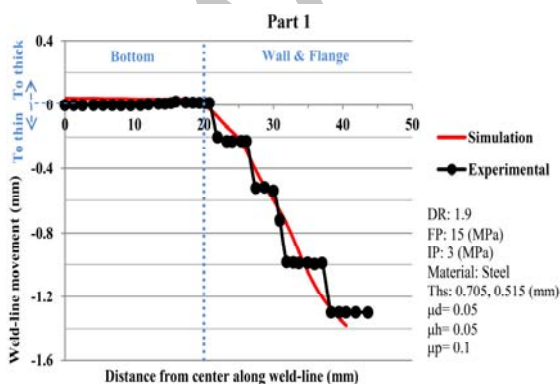
قطعه ۱ (شکل ۱۶) در نسبت کشش ۱/۹ و با فشار نهایی ۱۵ مگاپاسکال تولید شده است. در شکل ۱۷ مقادیر جابه‌جایی خط جوش قطعه ۱ در شبیه‌سازی و آزمایش تجربی مقایسه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مطابقت بسیار خوبی در نتایج وجود دارد. پله‌ای بودن نتایج تجربی به علت روش اندازه‌گیری اپراتور دستگاه CMM است.

در نمودارهای این مقاله، DR، Ths، FP، IP، μd ، μh و μp به ترتیب بیانگر نسبت کشش قطعه، ضخامت‌های دو بخش لوح ترکیبی، فشار نهایی و فشار اولیه سیال محفظه، ضرایب اصطکاک در سطح تماس رینگ کشش- ورق، ورق‌گیر- ورق و سنبه- ورق می‌باشند.

در شکل ۱۸ توزیع ضخامت در شبیه‌سازی با نتایج اندازه‌گیری ضخامت قطعه ۱ مقایسه شده است که مطابقت بسیار خوبی مشاهده می‌شود.



شکل (۱۶): قطعه ۱.

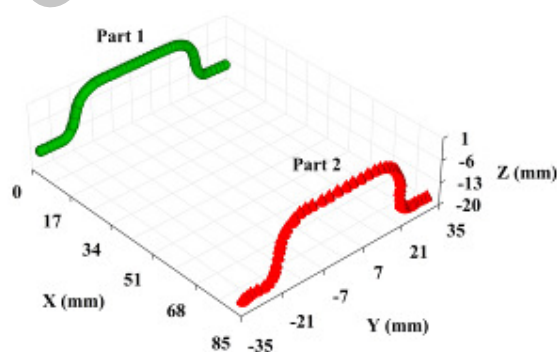


شکل (۱۷): مقایسه نتیجه شبیه‌سازی و آزمایش تجربی جابه‌جایی خط جوش قطعه ۱.

شبیه‌سازی‌ها مقایسه شده است. برای بررسی توزیع ضخامت محصولات در طول خط تقارن آنها، قطعات توسط فرآیند برش سیم از روی خط تقارن بریده شدند و میزان ضخامت در چند بخش مختلف آنها با استفاده از میکرومتر سر مخروطی (با تماس تقریباً نقطه‌ای) اندازه‌گیری شده است.



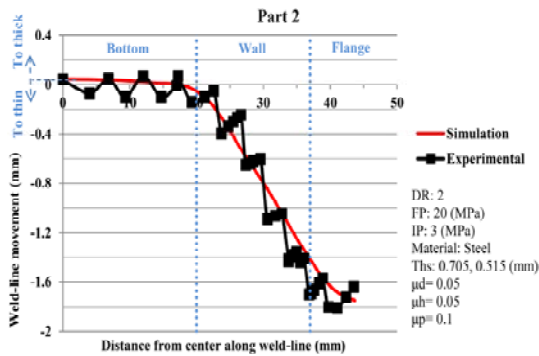
شکل (۱۴): بررسی مسیر خط جوش توسط دستگاه CMM.



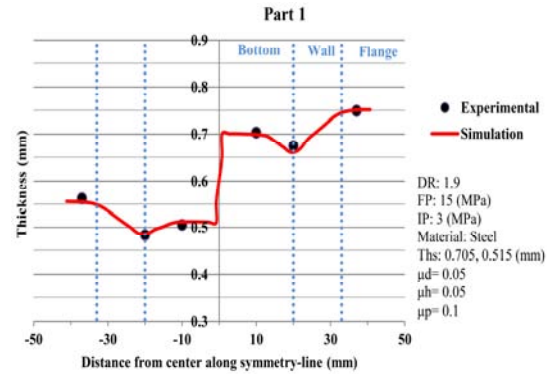
شکل (۱۵): مختصات خطوط جوش دو قطعه حاصل از آزمایش‌های تجربی به دست آمده از CMM.

۴- صحت‌سنجی نتایج

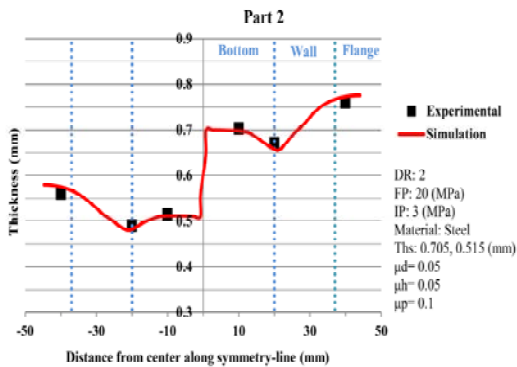
در این بخش، درستی نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نتایج آزمایش‌های تجربی و مقایسه جابه‌جایی خط جوش در طول خط جوش و توزیع ضخامت در طول خط تقارن ارزیابی می‌شود. شبیه‌سازی‌های این بخش فقط جهت مقایسه با نتایج تجربی و صحت‌سنجی شبیه‌سازی‌های اصلی انجام شده است. ابعاد قالب و لوح در این شبیه‌سازی‌ها مطابق با آزمایش‌های تجربی است، همچنین فشار اولیه محفظه با توجه به ابعاد لوح استفاده شده در آزمایش‌ها، ۳ مگاپاسکال انتخاب شده است.



شکل (۲۰): مقایسه‌ی نتیجه شبیه‌سازی و آزمایش تجربی جابه‌جایی خط جوش قطعه ۲.



شکل (۱۸): مقایسه نتیجه شبیه‌سازی و آزمایش تجربی توزیع ضخامت قطعه ۱.



شکل (۲۱): مقایسه نتیجه شبیه‌سازی و آزمایش تجربی توزیع ضخامت قطعه ۲.

قطعه ۲ (شکل ۱۹) در شرایطی متفاوت نسبت به قطعه ۱ و در نسبت کشش ۲ و با فشار نهایی ۲۰ مگاپاسکال تولید شده است. در شکل ۲۰ مقادیر جابه‌جایی خط جوش این قطعه در شبیه‌سازی و آزمایش تجربی مقایسه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود مطابقت خوبی در نتایج وجود دارد. از آنجایی که محورهای مختصات دستگاه اندازه‌گیری بر راستای خط جوش قطعه منطبق نبوده‌اند، نتایج پس از اندازه‌گیری در نرم‌افزار مناسب دوران داده شده که اریب شدن پله‌های مقادیر تجربی جابه‌جایی خط جوش را نتیجه داده است.



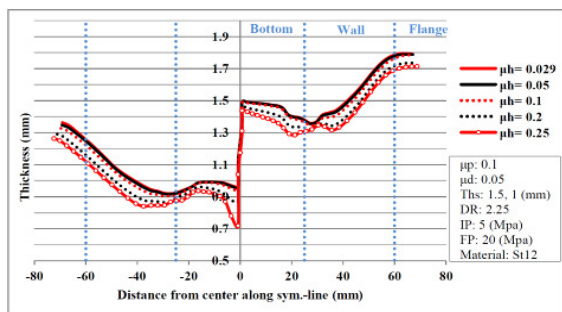
شکل (۱۹): قطعه ۲.

۵- نتایج و بحث

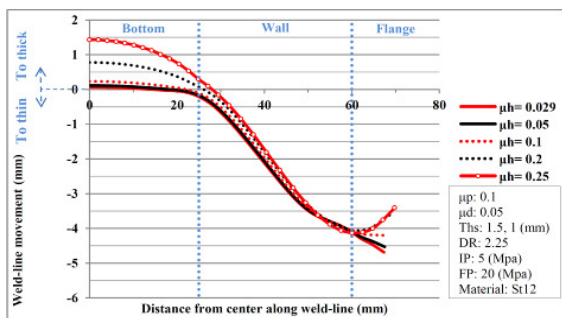
پس از تأیید صحت نتایج شبیه‌سازی‌ها در بخش قبل، در این بخش نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های اصلی ارائه و بررسی می‌شوند. با تغییر در مقادیر ضرایب اصطکاک بین ورق و اجزای قالب در این شبیه‌سازی‌ها، مقدار و چگونگی اثرگذاری این عوامل بر توزیع ضخامت و یا بیشینه نازک‌شدگی و همچنین جابه‌جایی خط جوش در محصول نهایی بررسی و مقایسه شده است. مقدار بیشینه نازک‌شدگی در گل محصول و به صورت درصد بیان شده و در نمودارهای توزیع ضخامت، ضخامت در طول خط تقارن محصول گزارش شده است (شکل ۲۲-الف). نمودارهای جابه‌جایی خط جوش، میزان حرکت هر گره از خط جوش در راستای عمود بر خط جوش اولیه را نمایش می‌دهند (شکل ۲۲-ب).

همان‌طور که در شکل ۲۳ نشان داده شده، خط جوش در راستای محور Z قرار دارد در نتیجه با توجه به موقعیت لوح، جابه‌جایی هر گره از خط جوش در جهت مثبت و منفی محور X، به ترتیب به عنوان جابه‌جایی به سمت بخش ضخیم و بخش نازک لوح ترکیبی گزارش شده است.

در شکل ۲۱ توزیع ضخامت در شبیه‌سازی با نتایج اندازه‌گیری ضخامت قطعه ۲ مقایسه شده است که مطابقت خوبی مشاهده می‌شود. اختلاف موجود در نتایج بررسی ضخامت و جابه‌جایی خط جوش محصولات در شبیه‌سازی‌ها و نتایج تجربی می‌تواند به علت ضخامت ناهمگون نقاط مختلف ورق‌های اولیه و ناهمسانگردی آنها و همچنین وجود اختلاف در شرایط اصطکاک و روند تغییر فشار سیال در شبیه‌سازی‌ها و آزمایش‌های تجربی باشد. همچنین وجود مقدار کمی نشتی در آزمایش‌ها، کنترل بر توزیع فشار سیال را در ناحیه فلنج محصول در طول فرآیند دشوار ساخته و می‌تواند بر نتایج نهایی تأثیرگذار باشد.



شکل (۲۴): اثر اصطکاک بین ورق گیر و ورق بر توزیع ضخامت در طول خط تقارن لوح.



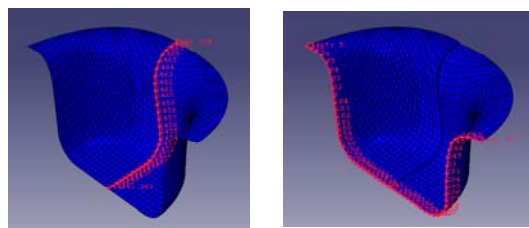
شکل (۲۵): اثر اصطکاک بین ورق گیر و ورق بر جابه جایی خط جوش در طول خط جوش لوح.

جدول (۱): خلاصه نتایج شبیه سازی های انجام شده برای بررسی اثر اصطکاک بین ورق گیر و ورق.

Blank-Holder Friction Coefficient	Max. Thinning (%) or Failure Indicator
۰/۰۲۹	۱۰/۰۸
۰/۰۵	۱۰/۴۴
۰/۱	۱۱/۲۱
۰/۱۵	۱۲/۱۲
۰/۲	۱۴/۲۵
۰/۲۵	۲۸/۱۰
۰/۳	Bottom of part

۵-۲- اثر اصطکاک بین رینگ کشش و ورق

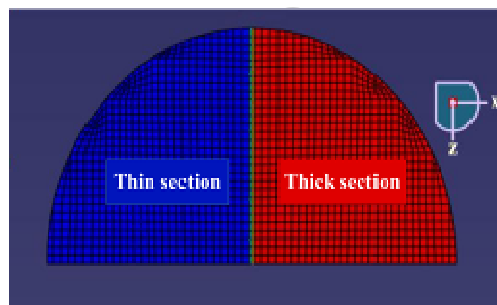
خلاصه ای از شبیه سازی های انجام شده با ضرایب اصطکاک متفاوت در سطح تماس بین رینگ کشش و ورق در جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به وجود فشار سیال، ورق تماس کمی با سطح رینگ کشش دارد، در نتیجه تغییر در میزان ضریب اصطکاک بین رینگ کشش و ورق در بازه مورد نظر، تأثیر چندانی در توزیع ضخامت ندارد (شکل ۲۶).



(ب)

(الف)

شکل (۲۲): مسیر اندازه گیری توزیع ضخامت (خط تقارن) و (ب) مسیر اندازه گیری جابه جایی خط جوش (خط جوش).



شکل (۲۳): موقعیت لوح ترکیبی نسبت به محورهای مختصات.

۵-۱- اثر اصطکاک بین ورق گیر و ورق

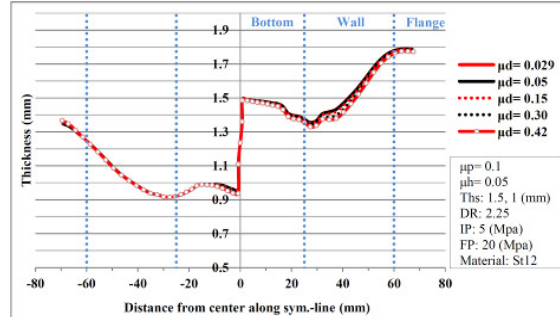
جدول ۱ خلاصه ای از شبیه سازی های انجام شده را نشان می دهد. شکل های ۲۴ و ۲۵ به ترتیب اثر اصطکاک بین ورق گیر و ورق را بر نمودار توزیع ضخامت و بیشینه نازک شدگی نشان می دهند. با افزایش میزان اصطکاک بین ورق گیر و ورق و در نتیجه با افزایش مقاومت در برابر سیلان مواد به داخل حفره قالب، نازک شدگی در کل ورق افزایش می یابد. در شکل ۲۴ و در نمودار مربوط به ضریب اصطکاک ۰/۲۵، یک نازک شدگی محلی در بخش نازک تر ورق و در نزدیکی خط جوش مشهود است. این نازک شدگی محلی که در اثر کرنش ناشی از جابه جایی خط جوش رخ داده است، در ضرایب اصطکاک بالاتر منجر به پارگی می شود.

همچنین در شکل ۲۵، با افزایش اصطکاک بین ورق گیر و ورق و در نتیجه با افزایش نیروی ورق گیری، سیلان ورق در ناحیه فلنج کاهش یافته و مقدار فلنج بیشتری باقی می ماند، در ادامه با افزایش کرنش، مقداری از مواد مورد نیاز از کف فنجان تأمین می شود که این امر با توجه به سطح تنش متفاوت بخش نازک تر و بخش ضخیم تر، جابه جایی بیشتر خط جوش در کف فنجان را به همراه دارد.

جدول (۳): خلاصه نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده برای بررسی اثر اصطکاک بین سنبه و ورق.

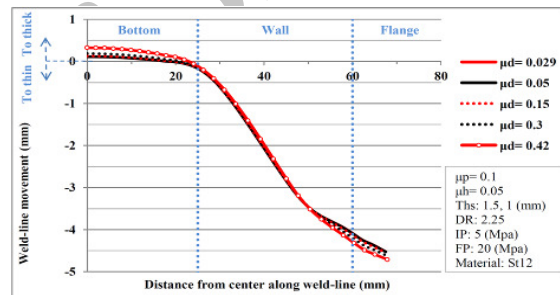
Punch Friction Coefficient	Max. Thinning (%) or Failure Indicator
۰/۰۲۹	Bottom of part
۰/۰۴	۱۷/۵۶
۰/۰۵	۱۱/۳۰
۰/۱	۱۰/۴۴
۰/۱۵	۱۰/۳۷
۰/۲	۱۰/۳۴
۰/۳	۱۰/۳۱
۰/۴۲	۱۰/۲۸

با توجه به تماس اندک، افزایش ضریب اصطکاک بین رینگ کشش و ورق، افزایش مقاومت اصطکاکی چندانی را به همراه ندارد و در نتیجه تأثیر زیادی بر میزان جابه‌جایی خط جوش نیز نمی‌گذارد (شکل ۲۷).

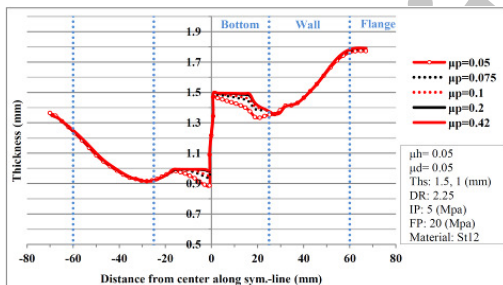


شکل (۲۶): اثر اصطکاک بین رینگ کشش و ورق بر توزیع ضخامت در طول خط تقارن لوح.

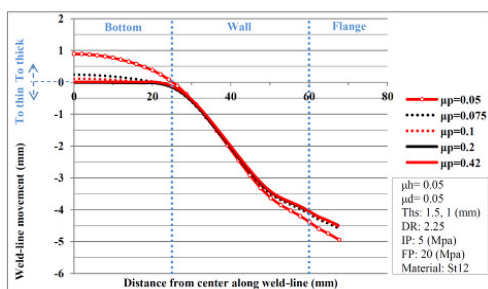
اصطکاک بین سنبه و ورق اثری به طور کامل متفاوت بر توزیع ضخامت و جابه‌جایی خط جوش دارد. شکل‌های ۲۸ و ۲۹ به ترتیب اثر اصطکاک بین سنبه و ورق را بر روی نمودار توزیع ضخامت و نمودار جابه‌جایی خط جوش نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود که با افزایش ضریب اصطکاک بین سنبه و ورق، نازک‌شدگی و جابه‌جایی خط جوش در کف سنبه کاهش می‌یابد.



شکل (۲۷): اثر اصطکاک بین رینگ کشش و ورق بر جابه‌جایی خط جوش در طول خط جوش لوح.



شکل (۲۸): اثر اصطکاک بین سنبه و ورق بر توزیع ضخامت در طول خط تقارن لوح.



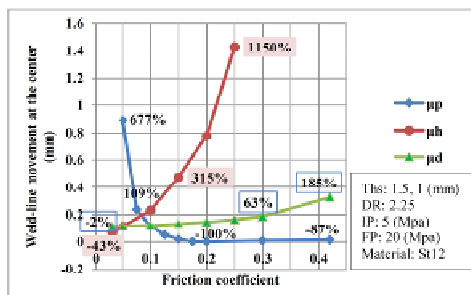
شکل (۲۹): اثر اصطکاک بین سنبه و ورق بر جابه‌جایی خط جوش در طول خط جوش لوح.

جدول (۲): خلاصه نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده برای بررسی اثر اصطکاک بین رینگ کشش و ورق.

Draw-Ring Friction Coefficient	Max. Thinning (%) or Failure Indicator
۰/۰۲۹	۱۰/۴۰
۰/۰۵	۱۰/۴۴
۰/۱	۱۰/۵۵
۰/۱۵	۱۰/۷۱
۰/۲	۱۰/۸۹
۰/۳	۱۱/۲۹
۰/۴۲	۱۱/۶۴

۵-۳- اثر اصطکاک بین سنبه و ورق

نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده برای بررسی اثر اصطکاک بین سنبه و ورق در جدول ۳ خلاصه شده است.



شکل (۳۱): مقایسه اثر اصطکاک سطوح اجزای مختلف قالب بر جابه‌جایی خط جوش در مرکز لوح.

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی لوح‌های ترکیبی با اعمال فشار شعاعی شبیه‌سازی و با استفاده از یک قالب آزمایشی، برخی از نتایج عددی با نتایج تجربی مقایسه شدند. انطباق خوبی در نتایج عددی و تجربی مشاهده شده است، به گونه‌ای که می‌توان از نتایج حاصل از این شبیه‌سازی‌ها و شبیه‌سازی‌های مشابه برای شناخت بهتر فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی لوح‌های ترکیبی و کمک به طراحی و تولید کارآمدتر محصولات مورد نیاز از لوح‌های ترکیبی استفاده کرد. با بررسی توزیع ضخامت و جابه‌جایی خط جوش به عنوان دو عامل مهم در شکل‌پذیری ورق‌های ترکیبی، اثر اصطکاک بین ورق و اجزای قالب به طور جداگانه بررسی شده است. همچنین اثر اصطکاک بین هر جزء از قالب و ورق بر مقادیر بیشینه نازک‌شدگی و جابه‌جایی خط جوش در مرکز لوح مقایسه شده‌اند. در نهایت نتایج زیر مشاهده شده است:

۱- افزایش ضریب اصطکاک بین ورق گیر و ورق موجب افزایش جابه‌جایی خط جوش در کف فنجان و قسمتی از دیواره شده که در ضرایب اصطکاک بالا نازک‌شدگی موضعی در کف فنجان ایجاد کرده و در نهایت سبب بروز پارگی شده است. نازک‌شدگی کلی نیز با افزایش ضریب اصطکاک بین ورق و ورق گیر افزایش یافته است،

۲- به علت تماس کم ورق با رینگ کشش به دلیل وجود فشار سیال، افزایش ضریب اصطکاک بین رینگ کشش و ورق تأثیر چندانی در نمودارهای جابه‌جایی خط جوش و توزیع ضخامت نداشته است،

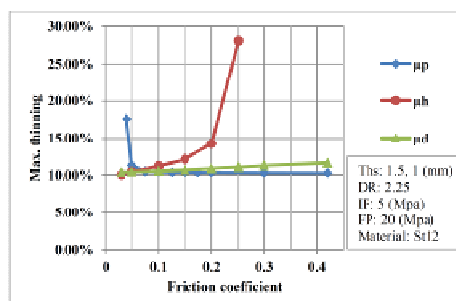
۳- افزایش ضریب اصطکاک بین سنبه و ورق اثر متفاوتی داشته و موجب کاهش و حتی حذف نازک‌شدگی و جابه‌جایی خط جوش در کف فنجان شده است و

با افزایش اصطکاک بین سنبه و ورق، گیرش ورق توسط سنبه بهتر انجام شده و شکل‌دهی ساده‌تر صورت می‌گیرد، همچنین سیلان مواد کف فنجان کاهش یافته، تا جایی که در ضرایب اصطکاک ۰/۲ و بالاتر کرنش در کف فنجان و دور از شعاع سنبه تقریباً حذف می‌شود، ضخامت ورق در این ناحیه تقریباً ثابت مانده و جابه‌جایی خط جوش در این منطقه حذف می‌شود.

۵-۴- مقایسه‌ی اثر اصطکاک سطوح اجزای مختلف قالب

در شکل ۳۰ اثر ضرایب اصطکاک سطوح مختلف قالب بر بیشینه نازک‌شدگی محصول مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود ضریب اصطکاک سطح ورق گیر بیشترین و ضریب اصطکاک سطح رینگ کشش کمترین اثر را بر بیشینه نازک‌شدگی دارند. لازم به ذکر است که هر چند تغییر در مقدار ضریب اصطکاک سطح سنبه، در مقادیر بالاتر از ۰/۰۵ نیز توزیع ضخامت در کف فنجان را به میزان قابل توجهی تغییر می‌دهد، ولی از آنجایی که در اغلب موارد بیشینه نازک‌شدگی در نزدیکی شعاع سنبه واقع شده است (شکل ۲۸)، در نتیجه افزایش بیشتر مقدار ضریب اصطکاک سطح سنبه در نمودار بیشینه نازک‌شدگی تأثیر چندانی ندارد.

شکل ۳۱ اثر ضرایب اصطکاک سطوح مختلف قالب بر میزان جابه‌جایی خط جوش در مرکز قطعه را نشان می‌دهد. در شرایط اصطکاکی پیش فرض ($\mu_d = 0/05$, $\mu_h = 0/05$ و $\mu_p = 0/1$) مقدار جابه‌جایی خط جوش در مرکز قطعه در حدود ۰/۱۱ میلی‌متر به دست آمده است. اعداد پیوست در نمودار شکل ۳۱، درصد افزایش این مقدار را در چند شرایط اصطکاکی دیگر نمایش می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود ضریب اصطکاک سطح ورق گیر بیشترین و ضریب اصطکاک سطح رینگ کشش کمترین اثر را بر میزان جابه‌جایی خط جوش دارند.



شکل (۳۰): مقایسه اثر اصطکاک سطوح اجزای مختلف قالب بر بیشینه نازک‌شدگی.

10. Meinders, T., Van Den Berg, A., and Huetink, J. "Deep Drawing Simulations of Tailored Blanks and Experimental Verification", *J. Materials Proc. Tech.*, Vol. 103, No. 1, pp. 65-73, 2000.
11. Abaqus User Guid, "Abaqus Analysis User's Manual", 2009.
12. Chan, S.M., Chan, L.C., and Lee, T.C. "Tailor-Welded Blanks of Different Thickness Ratios Effects on Forming Limit Diagrams", *J. Materials Proc. Tech.*, Vol. 132, No's. 1-3, pp. 95-101, 2003.
13. Assempour, A., Khakpour Nejadkhaki, H., and Hashemi, R. "Forming Limit Diagrams with the Existence of Through-thickness Normal Stress", *Computational Materials Sci.*, Vol. 48, No. 3, pp. 504-508, 2010.
14. "Coefficient of Friction", www.engineershandbook.com/Tables/frictioncoefficients.htm, 2006.
15. Rahmani, F. "Numerical and Experimental Investigation on Forming Limit in Hydroforming Process of Non-Circular Products", M.Sc. Thesis, Manuf. Group, Mech. Eng. Dep't., School of Eng., Tarbiat Modares Univ., 2009 (In Persian).
16. Hosseinzade, M., Mostajeran, H., Bakhshi, M., Gorji, A.H., Norouzi, S., and Hosseinipour, S.J. "Experimental and Numerical Investigations of the Effective Parameters in a New Sheet Hydroforming Method", *Aerospace Mech. J.*, Vol. 5, No. 3, pp. 55-68, 2009 (In Persian).
17. Gorji, A., Alavi-Hashemi, H., Bakhshi, M., Valizadeh, M.E., and Shirkorshidian, A. "Finite Element Simulation and Experimental Study of Forming Conical Parts, Using Hydrodynamic Deep Drawing with Radial Pressure", *Aerospace Mechanics J.*, Vol. 5, No. 3, pp. 69-79, 2009.
18. Shim, H. and Yang, D.Y. "A Simple Method to Determine Pressure Curve for Sheet Hydroforming and Experimental Verification", *J. Materials Proc. Tech.*, Vol. 169, No. 2, pp. 134-142, 2005.
19. Lang, L., Danckert, J., and Nielsen, K.B. "Investigation into Hydrodynamic Deep Drawing Assisted by Radial Pressure, Part II. Numerical Analysis of the Drawing Mechanism and the Process Parameters", *J. Materials Proc. Tech.*, Vol. 166, pp. 150-161, 2005.
20. Deylami-azodi, H. "Theoretical and Experimental Investigation into the Effect of Working Conditions on Hydro-mechanical Deep Drawing Process", Ph.D. Dissertation, Manuf. Group, Mech. Eng. Dep't., School of Eng., Tarbiat Modares Univ., 2008.

۴- ضرایب اصطکاک ورق‌گیر- ورق، سنبه- ورق و رینگ کشش- ورق، به ترتیب بیشترین تا کمترین تأثیر را بر روی بیشینه نازک‌شدگی محصول و همچنین میزان جابه‌جایی خط جوش در مرکز لوح داشته‌اند.

۷- مراجع

1. Kumar Panda, S. and Ravi Kumar, D. "Improvement in Formability of Tailor Welded Blanks by Application of Counter Pressure in Biaxial Stretch Forming", *J. Materials Proc. Tech.*, Vol. 204, No's. 1-3, pp. 70 -79, 2008.
2. Ahmetoglu, M.A., Brouwers, D., Taupin, L.S., Kinzel, G.L., and Altan, T. "Deep Drawing of Round Cups from Tailor-Welded Blanks", *J. Materials Proc. Tech.*, Vol. 53, No's. 3-4, pp. 684 694, 1995.
3. Kinsey, B., Liu, Z., and Cao, J. "A Novel Forming Technology for Tailor-Welded Blanks", *J. Materials Proc. Tech.*, Vol. 99, No's. 1-3, pp. 145-153, 2000.
4. Jiang, H.M., Li, S.H., Wu, H., and Chen, X.P. "Numerical Simulation and Experimental Verification in the Use of Tailor-Welded Blanks in the Multi-stage Stamping Process", *J. Materials Proc. Tech.*, Vol. 151, No's 1-3, pp. 316-320, 2004.
5. Chen, W., Lin, G.S., and Hu, S.J. "A Comparison Study on the Effectiveness of Stepped Binder and Weld Line Clamping Pins on Formability Improvement for Tailor-Welded Blanks", *J. Materials Proc. Tech.*, Vol. 207, No's 1-3, pp. 204-210, 2008.
6. Padmanabhan, R., Oliveira, M.C., and Menezes, L.F. "Deep Drawing of Aluminium-Steel Tailor-Welded Blanks" *J. Materials and Design*, Vol. 29, No. 1, pp. 154-160, 2008.
7. Gharakhani, M. "Investigation on Drawing Depth of Tailor Welded Blanks in Hydroforming Process", M.Sc. Thesis, School of Mech. Eng., College of Eng., Univ. of Tehran, 2008.
8. Pashirepour, J. "Investigation of the Weld Line Movements of Tailor Welded Blanks (TWBs) in Hydroforming", M.Sc. Thesis, School of Mech. Eng., College of Eng., Univ. of Tehran, 2008.
9. Ghoo, B.Y., Keum, Y.T., and Kim, Y.S. "Evaluation of the Mechanical Properties of Welded Metal in Tailored Steel Sheet Welded by CO2 Laser", *J. Materials Proc. Tech.*, Vol. 113, No's. 1-3, pp. 692-698, 2001.