



Numerical Study on Weld Line Displacement in Rubber Pad Forming of Tailor Welded Blanks

Hamed Deilami Azodi¹, Alireza Hassani², Siamak Mazdak³, Ali Zeinolabedin Beygi⁴, Ehsan Sherkatghanad^{5*}

¹Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran.

²M.Sc., Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran.

³Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Tafresh University, Tafresh, Iran.

⁴M.Sc Student, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

⁵Ph.D, School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing, China.

ARTICLE INFO

Article Type:

Original Research

Received: 05.10.2022

Revised: 06.25.2022

Accepted: 06.29.2022

Keyword:

Metal Forming

Tailor Welded Blank

Rubber Pad Forming

Weld Line Displacement

Finite Element Method

*Corresponding Author:

Ehsan Sherkatghanad

Email: ehsan_shgh@yahoo.com

ABSTRACT

Tailor welded blanks (TWBs) are increasingly used in the automotive and aerospace industries with the aim of reducing weight. Studying the forming processes of these sheets, examining their formability, as well as controlling factors such as the displacement of the weld line during forming can help to develop their application. The rubber pad forming process is a flexible forming process in which the sheet is deformed due to the pressure of a rigid punch with the help of a rubber cushion. In this paper, the rubber pad forming of tailor welded blank consisting of two welded sections with the same material but different thicknesses were simulated based on the finite element method and using ABAQUS software. The effects of various factors such as friction, thicknesses of the sheets that compose the TWB and the force applied to each section on the maximum displacement of the weld line were investigated through the use of a design of an experimental method. The results illustrated that increasing the thicknesses of the sheets that compose TWB, increasing the blank holding forces applied to each section, and reducing the friction between the TWB and the punch reduce the maximum amount of weld line displacement. In addition, increasing the thickness ratio of tailor welded blank led to an increase in the maximum weld line displacement. The simultaneous increase in the thickness of each section and the blank holding force applied to that section or the opposite section reduced the maximum amount of weld line displacement.



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Tailor welded blanks (TWBs) are increasingly used in the automotive and aerospace industries with the aim of reducing weight. Studying the forming processes of these sheets, examining their formability, as well as controlling factors such as the displacement of the weld line during forming can help to develop their application. Rubber pad forming process is a flexible forming process in which the sheet is deformed due to the pressure of a rigid punch with the help of a rubber cushion.

In this paper, the rubber pad forming of tailor welded blank consisting of two welded sections with the same material but different thicknesses was simulated based on the finite element method and using Abaqus software. The effects of various factors such as friction, thicknesses of the sheets that compose the TWB and the force applied to each section on the maximum displacement of the weld line was investigated by the use of the design of the experimental method.

Methodology

Numerical simulation of rubber pad forming of tailor welded blank was carried out by the finite element method, using Abaqus software. Due to the symmetry, one half of the geometry of the process was modelled. Figure 1 shows the components of the finite element model. The tailor welded blank was made of 0.2 and 0.4 mm thick low carbon steel St14 sheets. The hyperplastic behaviour of the rubber was considered using the Moony Rivlin model. The rubber used was silicone with a hardness of 60 Shore, grade A, and Poisson's ratio of 0.499.

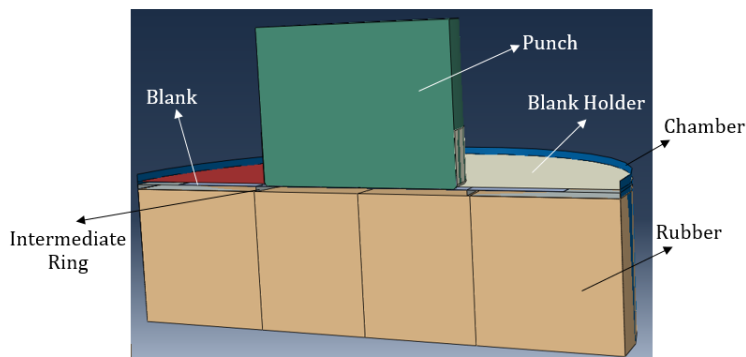


Figure 1. Components of the FE model.

Tailor welded blank and the rubber were modelled as three-dimensional deformable parts with S4R and C3D6H elements, respectively while the punch, blank holder and rubber chamber were modelled as discrete rigid bodies with R3D4 elements. Coulomb friction model was used at the contact surfaces.

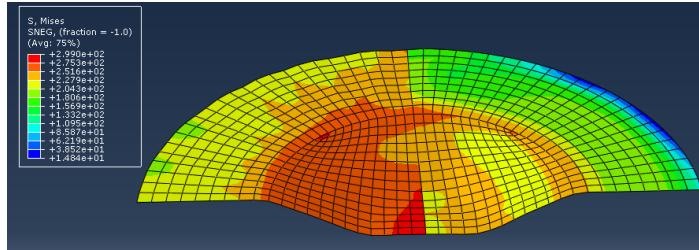


Figure 2. A blank formed in FE simulation.

In order to evaluate the displacement of the weld line during forming and the effect of process parameters, various simulations with different conditions of the process were planned using design of the experimental method. The thicknesses of the sheets considered were 0.2 and 0.4 mm. Blank holding forces applied to the two parts of Tailor Welded blank were 200 and 400 N and the values of 0.05, 0.1 and 0.15 were considered for the friction coefficient between the blank and the punch. Considering the independent blank holder forces for two parts of the blank and different thickness of two halves of the blank, the input parameters consisted of the following 5 parameters: the thicknesses of sections 1 and 2, the blank holding forces of parts 1 and 2 and the friction coefficient. In total, 30 different simulations were planned.

Results and discussion

To evaluate the validity of the numerical analysis, thickness distribution of a sheet formed by rubber pad forming obtained from FE simulation was compared with experimental results of Irthiea et al. (2014).

Figure 3 shows the effects of the friction coefficient in blank-punch interface and the thickness of each of the two halves of the blank on the maximum displacement of the weld line. It was observed that the increasing of friction coefficient and decreasing of thickness increased the displacement of the weld line. Moreover, as per Figure 4, it can be concluded that the increase in friction between the blank and the punch and the decrease in the blank holding force led to an increase in the displacement of the weld line.

Investigation of the simultaneous effects of thickness and blank holding force on the maximum displacement of the weld line (Figure 5) showed that increasing the thickness and the blank holding force of each part of blank decreased the displacement of the weld line.

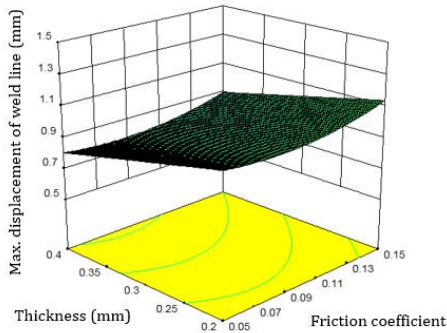


Figure 3. The effects of friction coefficient and thickness on the maximum displacement of weld line.

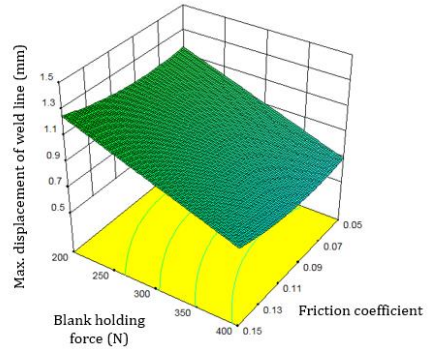


Figure 4. The effects of friction coefficient and blank holding force on the maximum displacement of weld line.

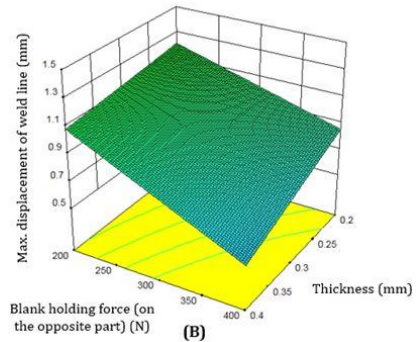
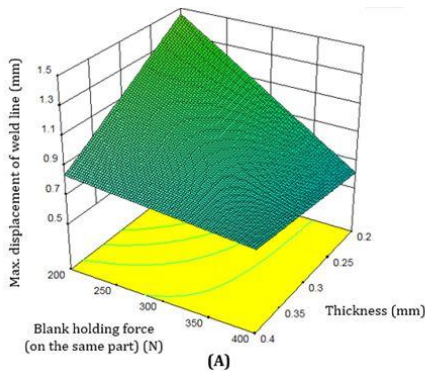


Figure 5. The effects of thickness of each part and blank holding force applied to A) the same part B) the opposite part on the maximum displacement of weld line.

Conclusion

Rubber pad forming of tailor welded blank consisting of two welded sections with the same material but different thicknesses was studied numerically using Abaqus. The influences of friction, thicknesses of the sheets that composed the TWB and the blank holding force applied to each section on the maximum displacement of the weld line were investigated. The results showed that increasing the thicknesses of each part, increasing the blank holding forces applied to each section and reducing the friction between the TWB and the punch reduced the maximum amount of weld line displacement. In addition, increasing the thickness ratio of TWB resulted in an increase of the maximum weld line displacement. Simultaneous increase in the thickness of each section and the blank holding force applied to that section or the opposite section reduced the maximum amount of weld line displacement.



بررسی عددی جابجایی خط جوش در شکل‌دهی ورق‌های ترکیبی فولادی به روش بالشتک لاستیکی

حامد دیلمی عضدی^۱، علیرضا حسینی^۲، سیامک مزدک^۳، علی زین‌العابدین بیگی^۴، احسان شرکت قناد^{۵*}

- ۱- دانشیار، گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران.
- ۲- کارشناسی ارشد، گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران.
- ۳- استادیار، گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش، تفرش، ایران.
- ۴- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
- ۵- دکتری، گروه مهندسی مکانیک و اتوماسیون، دانشگاه هوا فضا پکن (بیپهانگ)، پکن، چین.

اطلاعات مقاله

چکیده

ورق‌های ترکیبی جوشکاری شده با هدف کاهش وزن در صنایع خودرو و هوا فضا به‌طور فزاینده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. مطالعه‌ی فرایندهای شکل‌دهی این ورق‌ها، بررسی شکل‌پذیری آن‌ها، همچنین کنترل عواملی از قبیل جابجایی خط جوش در حین شکل‌دهی می‌تواند به توسعه‌ی کاربرد آن‌ها کمک نماید. فرایند شکل‌دهی ورق به کمک بالشتک لاستیکی از فرایندهای شکل‌دهی با انعطاف‌پذیر است که ورق در اثر اعمال فشار یک سنجه صلب و با کمک یک بلوک لاستیکی دچار تغییر شکل می‌شود. در این مقاله فرایند شکل‌دهی ورق ترکیبی با جنس یکسان و تفاوت ضخامت در دو بخش جوش شده، به کمک بالشتک لاستیکی بر مبنای روش اجزای محدود و با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS شبیه‌سازی شده است. به کمک روش طراحی آزمایش اثر عوامل مختلف از جمله اصطکاک، ضخامت ورق‌های تشکیل‌دهنده لوح ترکیبی و نیروی ورق‌گیر اعمالی به دو بخش ورق ترکیبی بر حداکثر میزان جابجایی خط جوش مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد افزایش ضخامت بخش‌های تشکیل‌دهنده ورق ترکیبی، افزایش نیروی ورق‌گیر اعمالی به هر یک از بخش‌ها و کاهش اصطکاک بین ورق و سنجه باعث کاهش حداکثر مقدار جابجایی خط جوش می‌شود. همچنین افزایش نسبت ضخامت در ورق ترکیبی، به افزایش حداکثر جابجایی خط جوش منجر می‌شود. افزایش هم‌زمان ضخامت هر بخش و نیروی ورق‌گیر وارد بر آن بخش و یا بخش مقابل باعث کاهش حداکثر مقدار جابجایی خط جوش می‌شود.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۲/۲۰

بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۰۴/۰۴

پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۴/۰۸

کلید واژگان:

شکل دادن فلزات
ورق ترکیبی جوشکاری شده
شکل‌دهی به کمک بالشتک لاستیکی
جابجایی خط جوش
روش اجزای محدود

*نویسنده مسئول: احسان شرکت قناد

پست الکترونیکی:

ehsan_shgh@yahoo.com



مقدمه

استفاده از ورق‌های ترکیبی، راهکار مناسبی برای دستیابی به هدف کاهش وزن در صنایع خودرو و هوافضا می‌باشد. با توجه به توجهات روزافزون به محیط زیست و الزامات مرتبط با موضوعات زیست محیطی، این کاهش وزن در خودروها، هواپیماها و سایر وسایل نقلیه می‌تواند مزیت‌های بسیاری به همراه داشته باشد.

ورق‌های ترکیبی جوش شده از اتصال دو یا چند بخش با ضخامت مختلف یا جنس متفاوت به یکدیگر به کمک روش‌های جوشکاری ساخته می‌شوند و شکل‌دهی این ورق‌ها از موضوعات مورد توجه پژوهشگران و صنعتگران بوده است. فرایند شکل‌دهی ورق به کمک بالشتک لاستیکی زیر مجموعه‌ای از فرایندهای شکل‌دهی با ابزار نرم و انعطاف‌پذیر است که ورق در اثر اعمال فشار یک سنبه صلب و با کمک یک بلوک لاستیکی - که جایگزین ماتریس شده است - دچار تغییر شکل می‌شود. عدم نیاز به ماتریس صلب و حذف عملیات ماشینکاری جهت ساخت ماتریس فلزی و در نتیجه، کاهش هزینه و زمان ساخت قالب از جمله مزایای این روش در مقایسه با روش‌های معمول شکل‌دهی است. پژوهش‌های مختلفی برای مطالعه‌ی شکل‌دهی ورق‌های ترکیبی انجام شده است.

احمداقلو و همکاران [۱] برای افزایش شکل‌پذیری لوح‌های ترکیبی و با هدف اعمال فشار متفاوت بر دو نیمه لوح، یک روش کنترل فشار را برای ورق‌گیر پیشنهاد دادند. در این روش از یک سیستم شامل ۶ سیلندر نیتروژن استفاده شده است. در این مطالعه آزمایش‌های تجربی روی لوح‌های گرد فلزی با خط جوش در مرکز و همچنین با فاصله از مرکز، انجام شده است. در کشش عمیق لوح‌های ترکیبی با نسبت ضخامت و یا نسبت استحکام متفاوت، شکست در کف فنجان و به موازات خط جوش روی می‌دهد که با استفاده از نیروی ورق‌گیر متفاوت قابل کنترل است. همچنین در این مطالعه نشان داده شده است که تغییر خواص ماده منطقه جوش به دلیل کوچک بودن این منطقه نسبت به کل لوح قابل صرف نظر کردن است.

در پژوهشی که توسط کینسی و همکاران [۲] انجام شده یک روش جدید مهار کردن خط جوش برای شکل‌دهی لوح‌های ترکیبی ارائه شده است. در این تحقیق از یک سیستم مهار کننده هیدرولیکی برای کنترل حرکت خط جوش استفاده شده است. مطابق نتایج شبیه‌سازی‌های این پژوهش کاهش بیشینه کرنش‌ها در راستای خط جوش تا یک پنجم گزارش شده است. همچنین نتایج نشان داده است که استفاده از این سیستم مهار کننده برای خط جوش، نگرانی از وقوع پارگی را کم کرده و سبب توزیع یکنواخت‌تر کرنش در بخش‌های نازک‌تر و ضخیم‌تر شده است. در تحقیقی که توسط چان و همکاران [۳] انجام شده، تأثیر نسبت ضخامت در لوح‌های ترکیبی بر روی نمودار حد شکل‌دهی بررسی شده است. لوح‌های ترکیبی بررسی شده در این تحقیق متشکل از ورق‌های فولادی با ترکیب ضخامتی متفاوت بوده است؛ از جوش لیزر برای اتصال ورق‌ها و تشکیل لوح ترکیبی استفاده شده است. یافته‌های آن‌ها نشان می‌دهد با افزایش نسبت ضخامت سطح منحنی‌های حد شکل‌دهی پایین می‌آید؛ به عبارت دیگر هرچه نسبت ضخامت بیشتر باشد، میزان شکل‌پذیری لوح ترکیبی کمتر خواهد بود.

جیانگ و همکاران [۴] روش شکل‌دهی چند مرحله‌ای را به عنوان یک راهکار برای افزایش خاصیت شکل‌پذیری ورق‌های ترکیبی پیشنهاد کرده‌اند. مطابق نتایج آن‌ها، خط جوش در ناحیه‌ی لبه به سمت فلز با ضخامت بیشتر حرکت می‌کند. همچنین مشاهده شده است تغییر مسیر کرنش در فرایند شکل‌دهی چند مرحله‌ای، می‌تواند برای کاهش پیک‌های کرنش مفید باشد.

معصومی و همکاران [۵] با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود فرآیند کشش عمیق مربعی لوح‌های ترکیبی را با نسبت‌های ضخامتی مختلف و موقعیت‌های مختلف خط جوش بررسی نمودند. وضعیت کرنش و حداکثر نیروی لازم برای شکل‌دهی لوح‌های ترکیبی با نسبت‌های مختلف ضخامتی با یکدیگر مقایسه شدند و حداکثر نسبت ضخامت ممکن برای شکل‌دهی ایمن به‌طور ضمنی استخراج شد.

در پژوهش‌های قبلی و همکاران [۶] تأثیر اختلاف ضخامت و جنس بر شکل‌پذیری لوح‌های ترکیبی بررسی شد. آنها نمودار حد شکل‌دهی لوح‌های ترکیبی با جنس یکسان و نسبت ضخامت‌های متفاوت و همچنین لوح‌های ترکیبی با ضخامت یکسان و جنس‌های متفاوت را استخراج نمودند. نتایج تجربی آن‌ها نشان می‌دهند که شکل‌پذیری لوح‌های ترکیبی نسبت به ورق‌های پایه کمتر شده است. همچنین شکل‌پذیری لوح‌ها با افزایش اختلاف ضخامت‌ها کاهش یافته است.

در پژوهشی که چنا و همکاران [۷] انجام داده‌اند تأثیر استفاده از ورق‌گیر پله‌دار و بین‌های نگه‌دارنده خط جوش بر شکل‌پذیری لوح‌های ترکیبی در کشش یک جعبه با استفاده از شبیه‌سازی و آزمایش‌های تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد استفاده از ورق‌گیر پله‌دار به کاهش پدیده چین‌خوردگی کمک کرده است، همچنین استفاده همزمان از ورق‌گیر پله‌دار و بین‌های نگه‌دارنده بهترین اثر را در بهبود شکل‌پذیری محصول داشته است.

پادماناپهان و همکاران [۸] با کمک شبیه‌سازی اجزای محدود شکل‌پذیری لوح‌های ترکیبی از جنس آلومینیوم و فولاد را مورد بررسی قرار دادند. لوح‌های ترکیبی استفاده شده در تحقیق آن‌ها از اتصال یک نوع ورق آلومینیومی با چهار نوع ورق فولادی تهیه شده، توسط سنبه مربعی شکل داده شد. آن‌ها نتیجه گرفتند نیروی ورق‌گیر متفاوت، می‌تواند به بهبود قابلیت شکل‌پذیری لوح‌های ترکیبی کمک نماید.

نریمانی و همکاران [۹] به بررسی شکل‌دهی ورق‌های ترکیبی جوش شده به کمک بالشتک لاستیکی پرداختند. آن‌ها در تحقیقات خود به این نتیجه رسیدند که شکل‌پذیری ورق ترکیبی در این روش به نسبت حالت استفاده از قالب صلب کاهش می‌یابد.

پاندا و همکاران [۱۰] شکل‌پذیری سه نوع متفاوت از لوح‌های ترکیبی را در کشش دو محوری به صورت عددی و تجربی مطالعه نمودند. لوح‌های ترکیبی از ورق‌های فولاد کم‌کربن با ضخامت‌ها و شرایط سطحی متفاوت توسط جوشکاری لیزر به هم متصل شدند. نتایج این تحقیق نشان داد در لوح‌های ترکیبی با اختلاف ضخامت، افزایش نسبت ضخامت ارتفاع حدی گنبد را کاهش داده است. همچنین در کشش دو محوری، جابجایی خط جوش به سمت فلز با استحکام بیشتر یا ضخامت بیشتر خواهد بود. بیشترین جابجایی خط جوش در نوک گنبد روی داده که با افزایش نسبت ضخامت بیشتر شده است.

صفدریان و همکاران [۱۱] با ارائه‌ی یک مدل تحلیلی، جابجایی خط جوش را در ورق‌های ترکیبی مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد هنگامی که نسبت ضخامت یا نسبت استحکام در ورق ترکیبی بزرگتر از مقدار معینی باشد، حرکت خط جوش افزایش می‌یابد و سبب کاهش شکل‌پذیری می‌شود.

صفدریان و همکاران [۱۲] تأثیر پارامترهای جوشکاری لیزر بر شکل‌پذیری ورق‌های ترکیبی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها از آزمون شکل‌پذیری اریکسن و آزمون کشش برای ارزیابی شکل‌پذیری و مقایسه اثر عوامل مختلف بر آن استفاده نمودند.

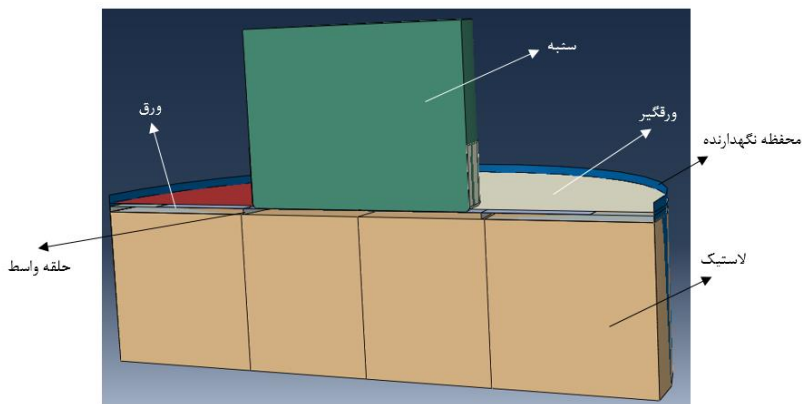
امین‌زاده و همکاران [۱۳] تأثیر نیروی ورق‌گیر و سرعت خطی جوشکاری لیزر و جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را بر عمق کشش و جابجایی خط جوش ورق‌های ترکیبی فولادی مورد بررسی قرار دادند. آنها همچنین سختی ناحیه‌ی جوش حاصل از این دو فرآیند را در ساخت ورق‌های ترکیبی اندازه‌گیری و مقایسه نمودند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد با افزایش سرعت خطی جوشکاری لیزر، عمق کشش و جابجایی خط جوش افزایش یافته است. با افزایش سرعت خطی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نیز میزان جابجایی خط جوش و عمق کشش افزایش یافته است. همچنین سختی ناحیه‌ی جوش لیزر بیشتر از سختی ناحیه‌ی مربوط به جوش اصطکاکی بوده است.

در این مقاله فرایند شکل‌دهی ورق ترکیبی جوشکاری شده با تفاوت ضخامت به کمک بالشتک لاستیکی با استفاده از روش اجزای محدود شبیه‌سازی می‌شود. استفاده از نیروی ورق‌گیر متفاوت در دو بخش ورق ترکیبی می-

تواند راهکاری جهت کنترل مناسب چین خوردگی در این ورق‌ها باشد؛ لذا در این شرایط بررسی میزان جابجایی خط جوش در حین تغییر شکل در این مقاله مورد مطالعه قرار می‌گیرد. اثر عوامل مختلف از جمله اصطکاک، ضخامت ورق‌های تشکیل دهنده لوح ترکیبی و نیروهای ورق گیر وارد شده بر بخش‌های مختلف ورق ترکیبی بر حداکثر میزان جابجایی خط جوش بررسی می‌شود.

شبیه‌سازی اجزای محدود

شبیه‌سازی عددی فرایند شکل‌دهی ورق‌های ترکیبی به کمک بالشتک لاستیکی به روش اجزای محدود، با استفاده از نرم‌افزار آباکوس^۱ و به صورت دینامیکی ضمنی انجام شده است. با توجه به تقارن، یک دوم هندسه فرایند مدل‌سازی شده است. در شکل ۱ اجزای مدل نشان داده شده است. ابعاد اصلی اجزای مدل در جدول ۱ آورده شده است.



شکل ۱. اجزای مدل فرایند شکل‌دهی به کمک بالشتک لاستیکی.

جدول ۱. جدول ابعاد اصلی اجزای مدل فرایند.

بعد	اندازه (mm)
قطر گرده‌ی اولیه	۸۰
ضخامت ورق	۰/۲-۰/۴
قطر لاستیک (ماتریس)	۱۰۰
ارتفاع لاستیک (ماتریس)	۲۷
قطر سنبله	۲۰

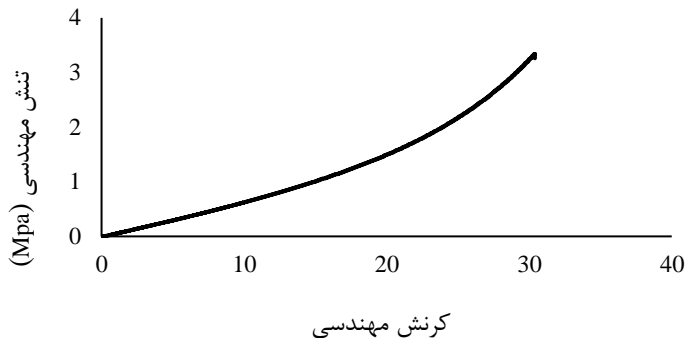
ورق ترکیبی از دو بخش با ضخامت‌های ۰/۲ و ۰/۴ میلیمتر و از جنس فولاد کم کربن St۱۴ بوده که خصوصیات مکانیکی آن در جدول ۲ آورده شده است.

^۱ ABAQUS

جدول ۲. خواص مکانیکی ورق فولاد St14 [۱۴]

پارامتر (یکا)	مقدار
مدول یانگ (مگاپاسکال)	۲۱۰۰۰۰
ضریب پواسون	۰/۲۹
تنش تسلیم (مگاپاسکال)	۱۸۰/۳
استحکام کششی (مگاپاسکال)	۳۵۸/۸
توان کرنش سختی	۰/۲۳

بالشتک لاستیکی نقش ماتریس را در فرایند ایفا می‌کند. رفتار هایپرلاستیک لاستیک با استفاده از معیار مونی ریولین^۱ در نظر گرفته شده است. این مدل تراکم ناپذیری را در رفتار لاستیک در مدل المان محدود تشریح می‌کند و ضرایب آن با استفاده از داده‌های حاصل از آزمایش فشار تک محوره لاستیک به دست می‌آید. لاستیک، از نوع سیلیکون با سختی ۶۰ شور^۲ گرید A با ضریب پواسون ۰/۴۹۹ بوده است. منحنی تنش-کرنش لاستیک در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. منحنی تنش و کرنش مهندسی لاستیک [۱۴]

سنبه، ورق گیر و محفظه لاستیک به صورت صلب در نظر گرفته شده‌اند. ۰/۱ میلی‌متر لقی بین سوراخ داخلی ورق-گیر و سنبه لحاظ شده است. تماس اجزای فرایند به صورت سطح به سطح و با ضریب اصطکاک کولمب تعریف شده - است. ضریب اصطکاک برای تماس ورق و سنبه مقادیر ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۱۵ در نظر گرفته شده است. ضریب اصطکاک برای تماس ورق و حلقه‌ی واسط با لاستیک ۰/۳۵، لاستیک و محفظه ۰/۱۲۵ و ورق و ورق گیر ۰/۰۵ در نظر گرفته شده است.

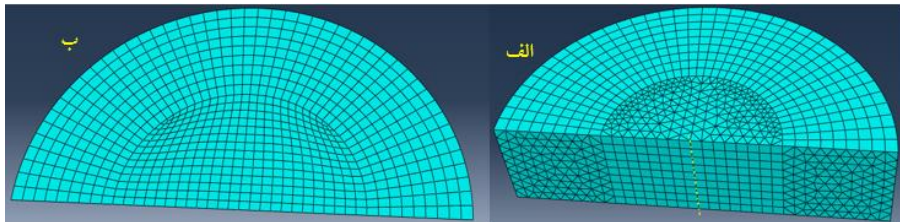
با توجه به اینکه فرایند به صورت یک دوم مدل شده است در لبه‌های اجزا قید تقارن اعمال شده است. سنبه صرفا در جهت محوری مجاز به حرکت بوده، به اندازه عمق کشش مورد نظر جابجایی به آن اعمال شده است. ورق گیر نیز تنها در جهت عمودی امکان حرکت داشته و نیروی ورق گیر به صورت بار گسترده به آن اعمال شده است. با توجه به اینکه در برخی حالت‌های بررسی، نیروی ورق گیر اعمالی به دو بخش ورق ترکیبی متفاوت بوده است، با مدلسازی

¹ Moony rivlin

² Shore

ورق گیر به صورت دو تکه امکان اعمال نیروی ورق گیر متفاوت برای دو ناحیه ورق ترکیبی فراهم شده است. حرکت محفظه لاستیک در تمام جهات کاملاً محدود شده است.

شبکه بندی ورق با استفاده از المان پوسته چهار نقطه‌ای با انتگرال کاهش یافته^۱ انجام شده است. ۷۶۶ المان برای ورق در نظر گرفته شده است که این تعداد پس از ارزیابی وابستگی نتایج تحلیل به اندازه مش ورق تعیین شده است. از المان سه بعدی شش نقطه‌ای^۲ برای شبکه بندی لاستیک استفاده شده است. طرح شبکه بندی ورق ترکیبی و بالشتک لاستیکی در شکل ۳ نشان داده شده است.

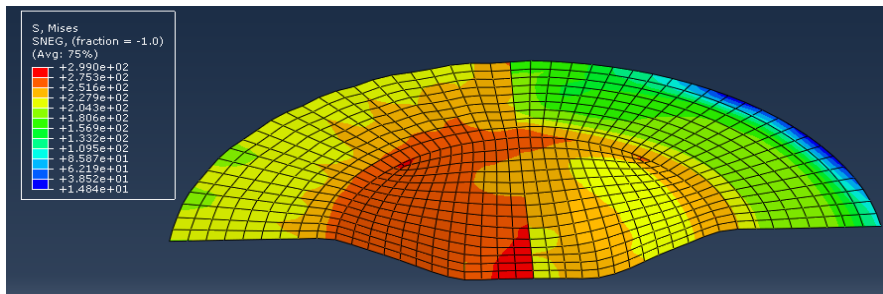


شکل ۳. طرح شبکه بندی (الف) ورق و (ب) لاستیک.

جدول ۳. نوع و تعداد المان اجزای مدل.

نام قطعه	نوع قطعه	نوع المان	تعداد المان
ورق	تغییر شکل پذیر	S4R	۷۶۶
لاستیک	تغییر شکل پذیر	C3D6H	۹۸۲۴
سنبه	صلب	R3D4	۲۳۵
محفظه لاستیک	صلب	R3D4	۸۴۰
ورق گیر	صلب	R3D4	۴۴
حلقه واسط	صلب	R3D4	۲۸۸

نمونه ورق شکل داده شده در شبیه سازی عددی در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴. نمونه ورق شکل داده شده در شبیه سازی.

¹ S4R

² C3D6H

طراحی آزمایش‌ها

جهت ارزیابی میزان جابجایی خط جوش در حین شکل‌دهی و اثر عوامل فرایند بر این جابجایی، شبیه‌سازی‌های مختلف با شرایط متفاوت فرایند با روش طراحی آزمایش، طرح و انجام شده است.

بر اساس مطالعات و بررسی‌های انجام شده و نیز با انجام شبیه‌سازی‌های مقدماتی، ضخامت ورق‌های تشکیل دهنده ورق ترکیبی، نیروی ورق‌گیر اعمالی به هر یک از دو بخش ورق ترکیبی و ضریب اصطکاک بین ورق و سنبه به عنوان پارامترهای ورودی برای طراحی آزمایش در نظر گرفته شده است. ضخامت ورق‌ها ۰/۲ و ۰/۴ میلی‌متر در نظر گرفته شد. نیروی ورق‌گیر اعمالی به بخش‌های دوگانه ورق ترکیبی در دو سطح ۲۰۰ و ۴۰۰ نیوتن بررسی شد و برای ضریب اصطکاک بین ورق و سنبه مقادیر مقادیر ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۱۵ در نظر گرفته شد. با توجه به مستقل بودن نیروی ورق‌گیر در دو بخش ورق و تفاوت ضخامت دو نیمه ورق، پارامترهای ورودی در طراحی آزمایش ۵ پارامتر شامل ضخامت بخش ۱، ضخامت بخش ۲، نیروی ورق‌گیر ۱، نیروی ورق‌گیر ۲ و ضریب اصطکاک بوده است؛ که با روش فول فاکتوریل و البته حذف حالت‌های تکراری در مجموع ۳۰ حالت مختلف از فرایند مورد شبیه‌سازی قرار گرفت و به کمک نتایج حاصل از آنها حداکثر جابجایی خط جوش و اثر عوامل مورد نظر بر آن مورد ارزیابی قرار گرفت. در جدول ۴ مشخصات آزمایش‌های مختلف آورده شده است.

جدول ۴. طراحی آزمایش بر اساس روش فول فاکتوریل.

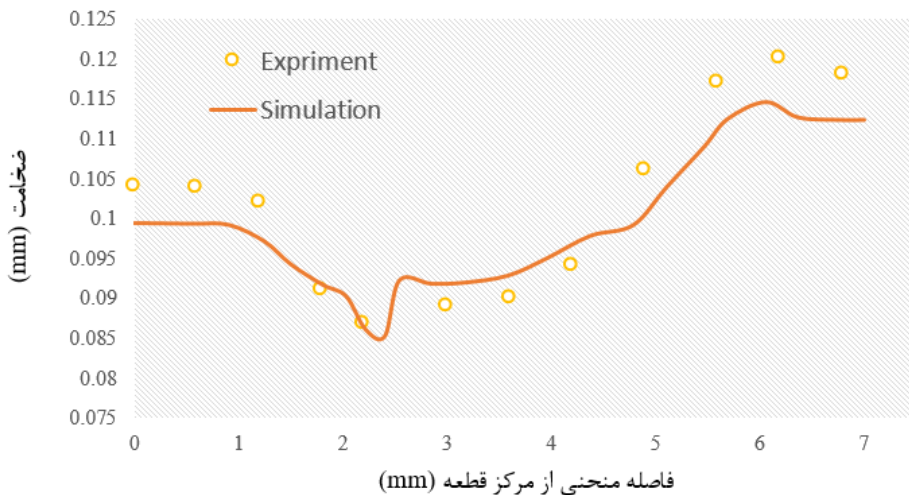
آزمایش	ضریب اصطکاک	ضخامت ورق ۱ (mm)	ضخامت ورق ۲ (mm)	نیروی ورق‌گیر ۱ (N)	نیروی ورق‌گیر ۲ (N)
۱	۰/۰۵	۰/۲	۰/۲	۲۰۰	۲۰۰
۲	۰/۰۵	۰/۲	۰/۲	۴۰۰	۴۰۰
۳	۰/۰۵	۰/۲	۰/۲	۲۰۰	۴۰۰
۴	۰/۰۵	۰/۴	۰/۴	۲۰۰	۲۰۰
۵	۰/۰۵	۰/۴	۰/۴	۴۰۰	۴۰۰
۶	۰/۰۵	۰/۴	۰/۴	۲۰۰	۴۰۰
۷	۰/۰۵	۰/۲	۰/۴	۲۰۰	۲۰۰
۸	۰/۰۵	۰/۲	۰/۴	۴۰۰	۴۰۰
۹	۰/۰۵	۰/۲	۰/۴	۲۰۰	۴۰۰
۱۰	۰/۰۵	۰/۲	۰/۴	۴۰۰	۲۰۰
۱۱	۰/۱	۰/۲	۰/۲	۲۰۰	۲۰۰
۱۲	۰/۱	۰/۲	۰/۲	۴۰۰	۴۰۰
۱۳	۰/۱	۰/۲	۰/۲	۲۰۰	۴۰۰
۱۴	۰/۱	۰/۴	۰/۴	۲۰۰	۲۰۰
۱۵	۰/۱	۰/۴	۰/۴	۴۰۰	۴۰۰
۱۶	۰/۱	۰/۴	۰/۴	۲۰۰	۴۰۰
۱۷	۰/۱	۰/۲	۰/۴	۲۰۰	۲۰۰
۱۸	۰/۱	۰/۲	۰/۴	۴۰۰	۴۰۰
۱۹	۰/۱	۰/۲	۰/۴	۲۰۰	۴۰۰
۲۰	۰/۱	۰/۲	۰/۴	۴۰۰	۲۰۰
۲۱	۰/۱۵	۰/۲	۰/۲	۲۰۰	۲۰۰

آزمایش	ضریب اضطکاک	ضخامت ورق ۱ (mm)	ضخامت ورق ۲ (mm)	نیروی ورق گیر ۱ (N)	نیروی ورق گیر ۲ (N)
۲۲	۰/۱۵	۰/۲	۰/۲	۴۰۰	۴۰۰
۲۳	۰/۱۵	۰/۲	۰/۲	۴۰۰	۲۰۰
۲۴	۰/۱۵	۰/۴	۰/۴	۲۰۰	۲۰۰
۲۵	۰/۱۵	۰/۴	۰/۴	۴۰۰	۴۰۰
۲۶	۰/۱۵	۰/۴	۰/۴	۴۰۰	۲۰۰
۲۷	۰/۱۵	۰/۲	۰/۴	۲۰۰	۲۰۰
۲۸	۰/۱۵	۰/۲	۰/۴	۴۰۰	۴۰۰
۲۹	۰/۱۵	۰/۲	۰/۴	۴۰۰	۲۰۰
۳۰	۰/۱۵	۰/۲	۰/۴	۲۰۰	۴۰۰

نتایج و بحث

ارزیابی درستی تحلیل عددی

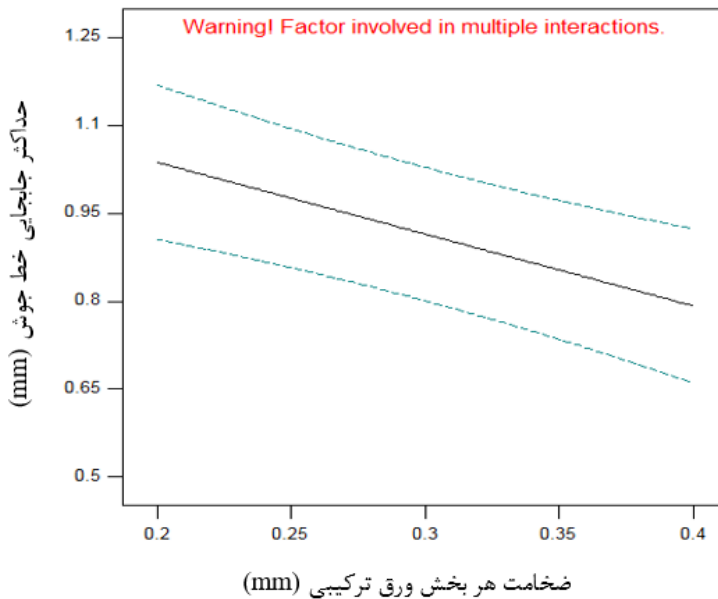
ارزیابی درستی نتایج حاصل از تحلیل عددی از طریق مقایسه‌ی نتایج عددی با نتایج تجربی ایرته و همکاران [۱۵] انجام شده است. برای این هدف تحلیل عددی فرایند شکل دهی با بالشتک لاستیکی با هندسه و شرایط فرایند کاملا مشابه آزمایش تجربی انجام گردید و توزیع ضخامت قطعه شکل داده شده در تحلیل عددی با نتایج تجربی مقایسه شد. در شکل ۵ مقایسه توزیع ضخامت ورق از جنس فولاد ضد زنگ AISI۳۰۴ با ضخامت ۰/۱ میلیمتر حاصل از تحلیل عددی با نتایج تجربی [۱۵] نشان داده شده است. نتایج گویای انطباق مناسب بین نتایج شبیه‌سازی عددی و آزمایش‌های تجربی است.



شکل ۵. مقایسه‌ی توزیع ضخامت حاصل از شبیه‌سازی برای ورق یکپارچه شکل داده شده با نتایج تجربی [۱۵].

اثر ضخامت بر حداکثر جابجایی خط جوش

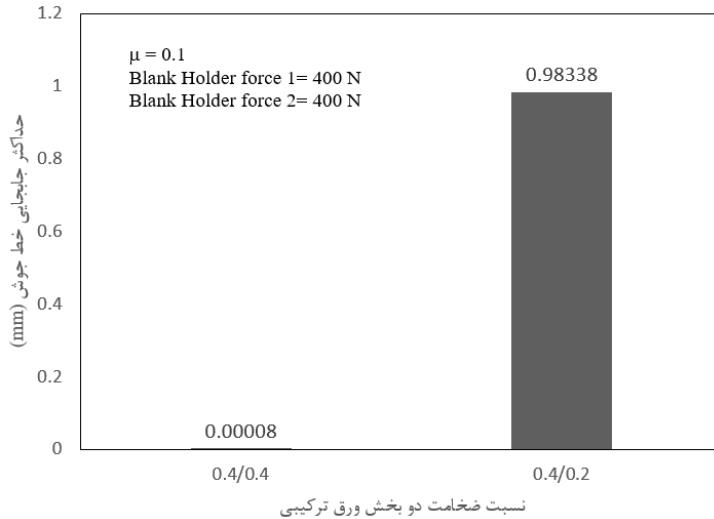
در شکل ۶ اثر ضخامت هر یک از دو بخش ورق ترکیبی بر حداکثر میزان جابجایی خط جوش نشان داده شده است. مطابق نتایج به‌طور کلی افزایش ضخامت دو نیمه ورق ترکیبی باعث کاهش ماکزیمم جابجایی خط جوش می‌شود.



شکل ۶. اثر ضخامت بر حداکثر جابجایی خط جوش.

اثر نسبت ضخامت بر حداکثر جابجایی خط جوش

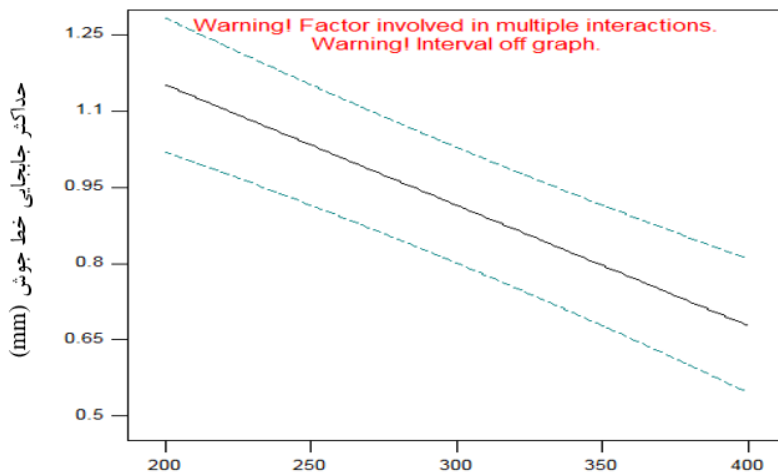
نسبت ضخامت‌های دو بخش ورق ترکیبی اثر قابل ملاحظه‌ای بر میزان جابجایی خط جوش خواهد داشت. در شکل ۷ اثر نسبت ضخامت‌ها بر حداکثر میزان جابجایی خط جوش نشان داده شده است. در تمامی حالت‌ها با ثابت ماندن سایر پارامترها، افزایش نسبت ضخامت به افزایش میزان جابجایی خط جوش منجر شده است. با توجه به یکسان بودن جنس دو بخش ورق ترکیبی، شدت تفاوت ضخامت دو بخش که با پارامتر نسبت ضخامت بیان شده است، تأثیر بسیار زیادی بر جابجایی خط جوش دارد. افزایش این نسبت منجر به تفاوت در جریان یافتن دو بخش در حین شکل‌دهی می‌گردد که به‌صورت افزایش جابجایی خط جوش بروز می‌نماید.



شکل ۷. اثر نسبت ضخامت دو بخش ورق ترکیبی بر حداکثر جابجایی خط جوش.

اثر نیروی ورق گیر بر حداکثر جابجایی خط جوش

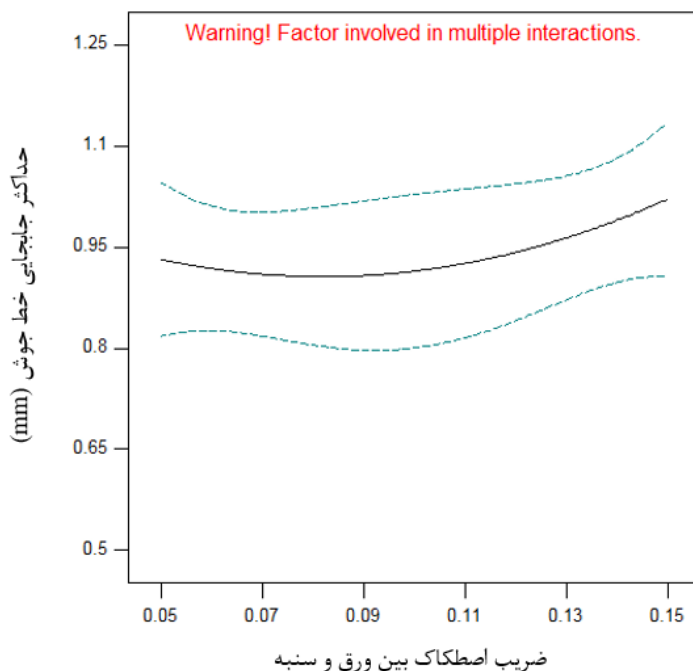
نیروی ورق گیر اعمالی به ورق از طریق کنترل جریان فلز می تواند بر میزان جابجایی خط جوش موثر باشد. در شکل ۸ اثر نیروی ورق گیر اعمال شده به هر یک از دو بخش ورق ترکیبی بر حداکثر میزان جابجایی خط جوش نشان داده شده است. به طور کلی افزایش نیروی ورق گیر موجب کاهش حداکثر جابجایی خط جوش شده است. همچنین با توجه به تفاوت ضخامت دو بخش ورق ترکیبی نیروی ورق گیر متفاوت اعمالی به دو بخش ورق ابزاری مهم برای کنترل جابجایی خط جوش خواهد بود.



شکل ۸. اثر نیروی ورق گیر بر حداکثر جابجایی خط جوش.

اثر اصطکاک بین سنبه و ورق بر حداکثر جابجایی خط جوش

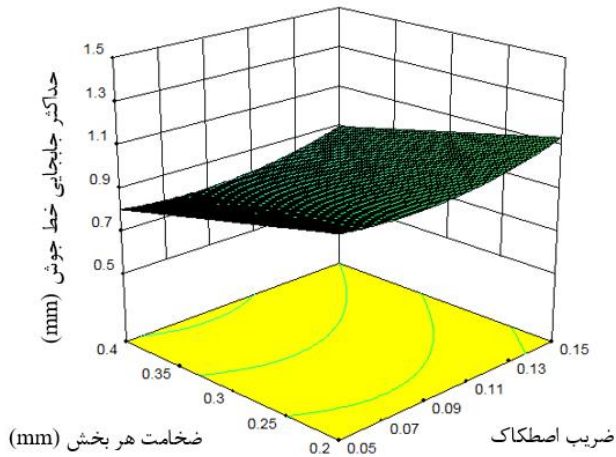
شکل ۹ نشان می‌دهد در حالت کلی افزایش ضریب اصطکاک بین سنبه و ورق باعث افزایش در میزان حداکثر جابجایی خط جوش می‌شود. گیرش مناسب‌تر ورق توسط سنبه با افزایش اصطکاک و در نتیجه افزایش میزان تغییر شکل ورق می‌تواند علت این افزایش باشد.



شکل ۹. اثر اصطکاک بین ورق و سنبه بر حداکثر جابجایی خط جوش.

اثر متقابل اصطکاک و ضخامت بر حداکثر جابجایی خط جوش

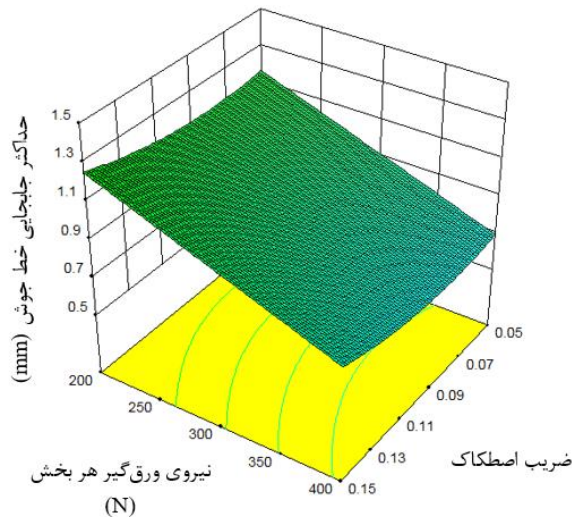
با توجه به وجود تداخل در اثر عوامل مختلف بر میزان جابجایی خط جوش بررسی اثر همزمان پارامترها به نحو مناسب‌تری بیانگر تغییرات خط جوش ناشی از تغییر عوامل فرایند خواهد بود. در شکل ۱۰ اثر متقابل ضریب اصطکاک بین ورق و سنبه و ضخامت هر یک از دو نیمه ورق بر حداکثر میزان جابجایی خط جوش نشان داده شده است. چنانچه مشهود است کاهش ضخامت و افزایش ضریب اصطکاک موجب بیشتر شدن میزان جابجایی خط جوش شده است.



شکل ۱۰. اثر متقابل اصطکاک بین ورق و سنبه و ضخامت هر یک از دو بخش ورق بر حداکثر جابجایی خط جوش.

اثر متقابل اصطکاک و نیروی ورق گیر بر حداکثر جابجایی خط جوش

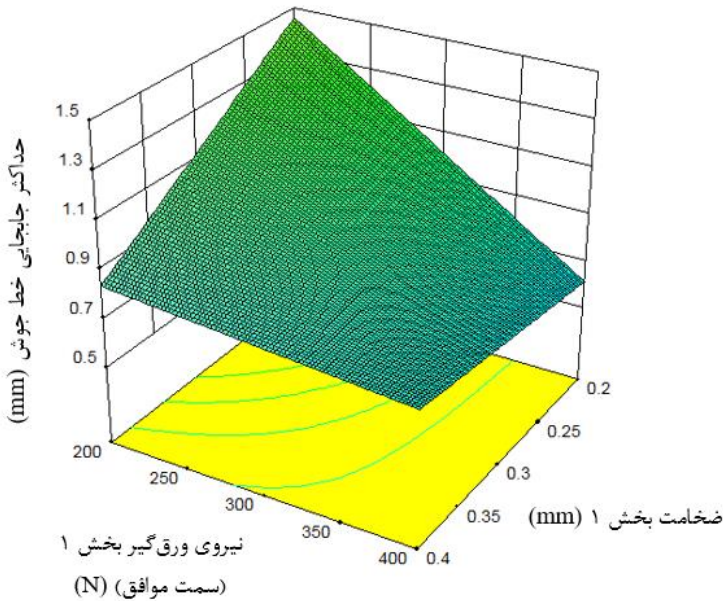
اثر متقابل اصطکاک و نیروی ورق گیر اعمالی به هر یک از نیمه‌های ورق بر ماکزیمم مقدار جابجایی خط جوش در شکل ۱۱ بررسی شده است. برای نیروی ورق گیر هر دو نیمه ورق نتیجه مشابه شکل ۱۱ به دست می‌آید. افزایش اصطکاک بین ورق و سنبه و نیز کاهش نیروی ورق گیر به‌طور همزمان به افزایش جابجایی خط جوش منجر شده است. در موارد بررسی شده در حالت ضریب اصطکاک ۰/۱۵ و نیروی ورق گیر ۲۰۰ نیوتن بیشترین جابجایی خط جوش مشاهده شده است.



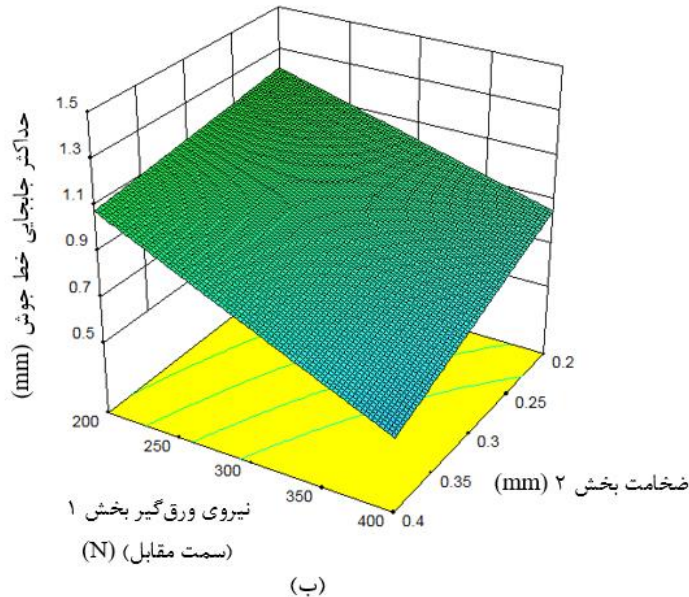
شکل ۱۱. اثر متقابل اصطکاک بین ورق و سنبه و نیروی ورق گیر اعمالی بر هر یک از دو بخش ورق بر حداکثر جابجایی خط جوش.

اثر متقابل نیروی ورق‌گیر و ضخامت بر حداکثر جابجایی خط جوش

در شکل‌های ۱۲ اثر همزمان ضخامت ورق و نیروی ورق‌گیر بر حداکثر جابجایی خط جوش بررسی شده است. در شکل ۱۲ الف ضخامت یک نیمه ورق و نیروی ورق‌گیر اعمالی به همان سمت (سمت موافق) ارزیابی شده است؛ در حالی که در شکل ب نیروی ورق‌گیر اعمالی به نیمه‌ی دیگر ورق (سمت مقابل) مد نظر بوده است. در هر صورت رفتاری تقریباً مشابه در هر دو حالت مورد بررسی مشاهده می‌شود؛ به گونه‌ای که با افزایش ضخامت و افزایش نیروی ورق‌گیر در هر دو سمت موافق و مقابل کاهش جابجایی خط جوش اتفاق می‌افتد. شدت کاهش جابجایی خط جوش بر اثر افزایش ضخامت در نیروی ورق‌گیر کم در همان سو (سمت موافق) بیشتر است. به عبارت دیگر در نیروی ورق‌گیر کم (سمت موافق) ضخامت ورق موثرتر است. به همین ترتیب اثر نیروی ورق‌گیر سمت موافق نیز در ضخامت‌های کم شدیدتر می‌باشد. اما مطابق شکل ۱۲ با افزایش نیروی ورق‌گیر در سمت مقابل، افزایش ضخامت تأثیر بیشتر بر کاهش جابجایی خط جوش می‌گذارد و به همین منوال در مقایسه با ورق‌های نازک، برای ورق‌های ضخیم‌تر نیروی ورق‌گیر سمت مقابل تأثیر بیشتری بر جابجایی خط جوش می‌گذارد. این نتایج نشان می‌دهد تنظیم میزان نیروی ورق‌گیر اعمالی به دو نیمه ورق ترکیبی البته با در نظر گرفتن شرایط عدم بروز چین‌خوردگی در هر دو نیمه، می‌تواند در کنترل میزان جابجایی خط جوش بسیار موثر باشد.



(الف)



شکل ۱۲. اثر متقابل ضخامت هر بخش و نیروی ورق گیر اعمالی بر الف) همان بخش ب) بخش مقابل بر حداکثر جابجایی خط جوش.

نتیجه گیری

در این مقاله جابجایی خط جوش در ورق‌های ترکیبی جوشکاری شده حین تغییر شکل در فرایند شکل‌دهی با بالشتک لاستیکی مورد مطالعه قرار گرفته است. شبیه‌سازی عددی شکل‌دهی ورق ترکیبی با جنس یکسان و تفاوت ضخامت در دو بخش جوش شده، به کمک بالشتک لاستیکی بر مبنای روش اجزای محدود و با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS انجام شد. پس از ارزیابی صحت شبیه‌سازی، با کمک طراحی آزمایش، حالت‌های مختلف از فرایند با مقادیر متفاوت ضریب اصطکاک بین ورق و سنبه، ضخامت ورق‌های تشکیل‌دهنده لوح ترکیبی و نیروی ورق‌گیر اعمالی به دو بخش ورق ترکیبی به صورت عددی تحلیل شد و حداکثر میزان جابجایی خط جوش مورد بررسی قرار گرفت. از جمله نتایج بدست آمده در این پژوهش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ۱- افزایش ضخامت بخش‌های تشکیل‌دهنده ورق ترکیبی، افزایش نیروی ورق‌گیر اعمالی به هر یک از بخش‌ها و کاهش اصطکاک بین ورق و سنبه باعث کاهش حداکثر مقدار جابجایی خط جوش می‌شود.
- ۲- افزایش نسبت ضخامت بخش‌های تشکیل‌دهنده ورق ترکیبی، به افزایش حداکثر جابجایی خط جوش منجر می‌شود.
- ۳- افزایش اصطکاک بین ورق و سنبه و کاهش همزمان نیروی ورق‌گیر وارد بر هر یک از بخش‌ها موجب افزایش جابجایی خط جوش می‌شود.
- ۴- افزایش ضخامت هر بخش و افزایش همزمان نیروی ورق‌گیر در هر دو سمت موافق و مقابل باعث کاهش حداکثر مقدار جابجایی خط جوش می‌شود.

- ۵- شدت کاهش جابجایی خط جوش بر اثر افزایش ضخامت در نیروی ورق‌گیر کم در سمت موافق بیشتر است. به همین ترتیب اثر نیروی ورق‌گیر سمت موافق نیز در ضخامت‌های کم شدیدتر می‌باشد.
- ۶- اثر افزایش ضخامت بر کاهش جابجایی خط جوش با افزایش نیروی ورق‌گیر در سمت مقابل شدت می‌یابد و به همین منوال برای ورق‌های ضخیم نسبت با ورق‌های نازک، نیروی ورق‌گیر سمت مقابل تأثیر بیشتری بر جابجایی خط جوش می‌گذارد.
- ۷- اعمال نیروی ورق‌گیر متفاوت به دو نیمه ورق ترکیبی می‌تواند راهکاری مناسب برای کنترل میزان جابجایی خط جوش حین فرایند شکل‌دهی باشد.

References

- [1] Ahmetoglu, M. A., Brouwers, D., Shulkin, L., Taupin, L., Kinzel, G. L., & Altan, T. (1995). Deep drawing of round cups from tailor-welded blanks. *Journal of Materials Processing Technology*, 53(3-4), 684-694. [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(94\)01767-U](https://doi.org/10.1016/0924-0136(94)01767-U)
- [2] Kinsey, B., Liu, Z., & Cao, J. (2000). A novel forming technology for tailor-welded blanks. *Journal of Materials Processing Technology*, 99(1-3), 145-153. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(99\)00412-4](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00412-4)
- [3] Chan, S. M., Chan, L. C., & Lee, T. C. (2003). Tailor-welded blanks of different thickness ratios effects on forming limit diagrams. *Journal of Materials Processing Technology*, 132(1-3), 95-101. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00407-7](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00407-7)
- [4] Jiang, H. M., Li, S. H., Wu, H., & Chen, X. P. (2004). Numerical simulation and experimental verification in the use of tailor-welded blanks in the multi-stage stamping process. *Journal of Materials Processing Technology*, 151(1-3), 316-320. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.294>
- [5] Masoumi, A., Abri Nia, K., & Taebi, M. (2005). Simulation and analysis of TWB deep drawing. *University College of Engineering*, 39(1), 73-82. https://journals.ut.ac.ir/article_10120_0.html
- [6] Sepasi, M. (2007). *Experimental investigation of forming limit diagram (FLD) of tailor welded blank (TWB)* [Master, Tehran]. Iran. <https://www.virascience.com/thesis/472702/>
- [7] Chen, W., Lin, G. S., & Hu, S. J. (2008). A comparison study on the effectiveness of stepped binder and weld line clamping pins on formability improvement for tailor-welded blanks. *Journal of Materials Processing Technology*, 207(1-3), 204-210. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.12.100>
- [8] Padmanabhan, R., Oliveira, M. C., & Menezes, L. F. (2008). Deep drawing of aluminium-steel tailor-welded blanks. *Materials & Design*, 29(1), 154-160. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.11.007>
- [9] Narimani, R., Sedighi, M., Shahrjerdi, E., & Deilami Azodi, H. (2009, March 3). *Experimental and numerical investigation of the pressing force and displacement of Taylor welding blank welding line in the mandrel and matrix forming method compared to the rubber cushion forming method*. 9th Iranian Conference on Manufacturing Engineering, Birjand, Iran. <https://civilica.com/doc/79725/>

- [10] Panda, S. K., & Ravi Kumar, D. (2010). Experimental and numerical studies on the forming behavior of tailor welded steel sheets in biaxial stretch forming. *Materials & Design*, 31(3), 1365-1383. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.08.046>
- [11] Korouyeh, R. S., Moslemi Naeini, H., Liaghat, G. H., & Kasaei, M. M. (2012). Investigation of weld line movement in tailor welded blank forming. *Advanced Materials Research*, 445, 39-44. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.445.39>
- [12] Korouyeh, R. S., Naeini, H. M., Torkamany, M., & Sabaghzadee, J. (2012). Effect of laser welding parameters on forming behavior of tailor welded blanks. *Advanced Materials Research*, 445, 406-411. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.445.406>
- [13] Aminzadeh, A., Safari, A., & Parvizi, A. (2019). Experimental Study of Weld Line Displacement and Drawing Depth in TWBs Steel Sheets Manufactured by Laser and Friction Stir Welding. *Modares Mechanical Engineering*, 19(9), 2183-2192. <http://mme.modares.ac.ir/article-15-27924-en.html> <http://mme.modares.ac.ir/article-15-27924-en.pdf>
- [14] Golmakani, H. (2015). *Numerical and experimental of effective parameters in deep drawing process for square sections with rubber components* [Master, Tafresh]. Iran. <http://faculty.tafreshu.ac.ir/mazdak/fa/facultyThesis/158/>
- [15] Irthia, I., Green, G., Hashim, S., & Kriama, A. (2014). Experimental and numerical investigation on micro deep drawing process of stainless steel 304 foil using flexible tools. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 76, 21-33. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2013.09.006>