

بررسی تجربی استحکام و عمق کشش ورق‌های ترکیبی جوشکاری شده به روش‌های اصطکاکی اغتشاشی و قوس تنگستن

احمد امین زاده¹، امیر صفری¹، علی پرویزی^{2*}

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

* تهران، صندوق پستی 11155-4563، aliparvizi@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 14 اسفند 1396

پذیرش: 28 فروردین 1397

ارائه در سایت: 21 اردیبهشت 1397

کلید واژگان:

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

جوشکاری قوس تنگستن

ورق‌های ترکیبی

جابه‌جایی خط جوش

چکیده

دستیابی به استحکام و عمق کشش بالاتر از مسائل مهم در فرآیند شکل‌دهی ورق‌های ترکیبی می‌باشد. شکل‌پذیری ورق‌های ترکیبی، به دلیل وجود منطقه جوش و استحکام متفاوت بین ورق‌ها، غالباً کمتر از مواد پایه است. هدف از این پژوهش، مقایسه عمق کشش، جابه‌جایی خط جوش و استحکام تسلیم در بخش‌های مختلف ورق‌های ترکیبی می‌باشد که با استفاده از دو فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و جوشکاری قوس تنگستن تحت پوشش گاز محافظ (تیگ) تولید شده‌اند. روش‌های جوشکاری ذوبی با تشکیل فازهای ترد در حوضچه مذاب، باعث کاهش استحکام جوش می‌شوند. پارامترهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نیز تاثیر زیادی در کیفیت جوش دارند. در این مقاله، با طراحی آزمایش‌های تجربی، تاثیر پارامترهای سرعت خطی، جریان جوشکاری و نیروی ورق‌گیر بر میزان جابه‌جایی خط جوش، عمق کشش ورق‌های ترکیبی و همچنین سختی ناحیه جوش مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش سرعت خطی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، میزان عمق کشش و جابه‌جایی خط جوش افزایش خواهد یافت. به علاوه، با افزایش جریان جوشکاری ذوبی، مقدار عمق کشش افزایش یافته ولی میزان جابه‌جایی خط جوش کاهش یافته است. همچنین سختی ناحیه جوش اصطکاکی اغتشاشی بیشتر از سختی ناحیه مربوط به جوشکاری قوس تنگستن می‌باشد.

Experimental Study of Strength and Drawing Depth in TWBs Sheets Manufactured by Friction Stir and Fusion Welding

Ahmad Aminzadeh, Amir Safari, Ali Parvizi*

School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

*P.O.B. 11155-4563, Tehran, Iran, aliparvizi@ut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 05 March 2018
Accepted 17 April 2018
Available Online 11 May 2018

Keywords:

Friction Stir Welding
Fusion Welding
Tailor Welded Blanks (TWBs)
Weld Line Movement

ABSTRACT

Having the higher strength and drawing depth are some key challenges in forming of TWBs sheets. The formability of TWBs is almost less than the base materials due to existence of the welding zone and differences between the sheets strength. The aim of this study is to compare the drawing depth, weld line movement, and the yield strength in various sections of TWBs produced by both friction stir welding and fusion welding (TIG). Fusion welding methods will reduce the strength of weld due to the formation of brittle phases in the molten pool. Friction stir welding parameters have also great influences on the welding quality. Having designed the experiments, the effect of linear velocity, welding power and blank holder force on weld line displacement, drawing depth of TWBs and hardness of the weld zone have been investigated in this paper. Results show that by increasing the linear velocity of friction stir welding, the amount of weld line displacement and drawing depth will increase. Furthermore, by increasing the power of fusion welding, drawing depth increases but weld line displacement reduces. The harnesses of the friction stir welding zone are higher than those ones for TIG welding zone.

1- مقدمه

کاهش وزن خودرو و در نتیجه هزینه ساخت هستند تا از این طریق میزان مصرف سوخت را کاهش دهند. یک راه برای دستیابی به این نیاز، استفاده از ورق‌های ترکیبی در بدنه خودرو است. امکان داشتن یک توزیع متنوع در جنس مواد و خواص هندسی در یک قطعه می‌تواند توزیع بهینه مواد را در آن قطعه فراهم آورده و باعث کاهش چشمگیر وزن و هزینه شود [1].

یک ورق ترکیبی متشکل از دو یا چند ورق با ضخامت یا جنس متفاوت است که به هم جوش شده‌اند تا با توجه به کاربری لازم در هر منطقه نظیر استحکام بالاتر، فرم‌پذیری بیشتر و موارد مشابه، نوع مناسبی از ورق برای اتصال استفاده شود. طراحان خودرو به دنبال یافتن روش‌هایی جدید برای

Please cite this article using:

A. Aminzadeh, A. Safari, A. Parvizi, Experimental Study of Strength and Drawing Depth in TWBs Sheets Manufactured by Friction Stir and Fusion Welding, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 05, pp. 255-262, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

صورت متغیر مکانی را در کشش عمیق یک قطعه مستطیل شکل بررسی کردند. آن‌ها در قسمت‌های مورد نیاز بر روی ورق‌گیر با استفاده از فشار هیدرولیک در حفره‌های ماشینکاری شده، فشار مورد نیاز در قسمت‌های مختلف ورق‌گیر را کنترل نموده و توزیع ضخامت را بررسی نمودند. راتو و همکاران [16] از طریق جداول تاگوچی، تاثیر پنج پارامتر ضریب اصطکاک، قطر سنبه، شعاع ماتریس و لقی را در سه سطح، انتخاب و توسط نرم‌افزار شبیه‌سازی نمودند. آنها میزان چروک و پارگی را مورد بررسی قرار دادند.

ونکات و همکاران [17] تاثیر پارامترهای مختلف بر روی چروک یک قطعه فنجان شکل را بررسی نمودند. آن‌ها پارامترهای شعاع گوشه‌های سنبه و ماتریس، قطر سنبه و ماتریس، نیروی ورق‌گیر را به صورت جداگانه بررسی و مورد تحلیل قرار دادند. فضلی [18] با استفاده از طول مسیر تغییر شکل گره‌های مرزی، شکل اولیه مناسب و بهینه ورق‌های جوش‌خورده به هم را مورد بررسی قرار داد. نتایج تحقیقات او نشان داد که بهینه‌سازی شکل ورق باعث حرکت کمتر خط جوش خواهد شد. ضیائی‌پور و موسوی [19] با استفاده از نرم‌افزار المان محدود، تاثیرات فشار متغیر ورق‌گیر بر روی ضخامت ورق را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که تغییر فشار ورق‌گیر، میزان نازک‌شدگی ورق را به میزان 5 درصد کاهش می‌دهد.

صفدریان و همکاران [20] با انجام آزمون خمش سه‌نقطه در راستاهای مختلف و ترکیبی از شش گروه از ضخامت‌ها و جنس‌های متفاوت، در مجموع 36 آزمایش متفاوت انجام دادند. آن‌ها با رسم نمودارهای نیرو-جابجایی به بررسی پارامترهای تأثیرگذار در جابجایی خط جوش و همچنین تأثیر زاویه خط جوش بر خواص مکانیکی و انرژی جذب‌شده پرداختند. نبراو [21] به منظور کاهش پارگی و چین و چروک در فرآیند کشش عمیق، تاثیر شعاع لبه سنبه و نیروی ورق‌گیر را مورد بررسی قرار داد. کاتکاند و همکاران [22] با استفاده از شبکه عصبی، اهمیت سه پارامتر ورودی شامل سرعت سنبه، درجه حرارت و نیروی ورق‌گیر را بر پارامترهای خروجی شامل تنش اصلی و فرعی از طریق شبیه‌سازی و مطالعه تجربی مقایسه نمودند. سونگ و همکاران [23] با انجام آزمایش اریکسون و تعریف شاخص برای نسبت ضخامت‌های متفاوت در ورق‌های ترکیبی، و همچنین استفاده از یک فرمول تجربی برای شبیه‌سازی ناحیه جوشکاری شده، شروع شکست ورق در نسبت ضخامت‌های مختلف را بررسی کردند.

هان و همکاران [24] تاثیر نیروی ورق‌گیر در کشش عمیق را بر روی نسبت کشش بررسی نمودند. آن‌ها در تحقیقات خود، شبیه‌سازی را توسط نرم‌افزار انجام دادند و نیروی ورق‌گیر مناسب را بدست آوردند. مرادی و همکاران [25] تاثیر ابعاد هندسی بر جوشکاری ترکیبی لیزر و تیگ برای فولاد ضد زنگ را به صورت عددی و تجربی بررسی کردند. آن‌ها به منظور شبیه‌سازی عددی فرآیند از یک مدل سه بعدی اجزا محدود استفاده کردند. سپس با انجام آزمایش‌های تجربی نتایج حاصل این مدل را تایید کردند. رسانایی ماده مهم‌ترین عامل تأثیرگذار بر روی ابعاد بستر جوش بود. سیلوا و همکاران [26] با استفاده از دو نوع فرآیند جوشکاری پلاسما و لیزر به بررسی تفاوت‌های خواص مکانیکی و سختی‌سنجی دو نمونه پرداختند. آن‌ها با انجام آزمایش‌های مختلف و نیز اندازه‌گیری تنش پسماند در دو راستای ضخامت و سطح، هر دو نمونه را به یکدیگر مقایسه کردند. مرادی و همکاران [27] به بررسی تجربی تأثیر پارامترهای فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر روی اتصال دو آلیاژ غیرمشابه آلومینیوم پرداختند. آن‌ها تأثیر سرعت چرخشی و سرعت خطی ابزار را بر روی ریزساختار، ماکروساختار و خواص مکانیکی اتصال‌ها بررسی کردند. نتایج نشان داد که در نسبت‌های سرعت چرخشی به

شای و همکاران [2-3] شرایط بهینه و مناسب را برای به دست آوردن جوش مناسبی که شکل‌پذیری ورق‌های ترکیبی را افزایش دهد، مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها بر اساس آزمایش‌های تجربی پیشنهاد کردند که پارگی در ورق‌های ترکیبی زمانی رخ خواهد داد که نسبت ضخامت و نسبت استحکام بیشتر از کرنش پلاستیک ورق نازک‌تر باشند. هتو و همکاران [4] به بررسی تأثیر ورق‌گیر کنترل نیروی اعمالی در حرکت خط جوش ورق‌های جوش‌خورده به هم در فرآیند کشش عمیق پرداختند. آن‌ها نشان دادند که با اعمال نیرو به قسمت‌های مختلف خط جوش و کنترل حرکت آن، فرآیند کشش عمیق بهبود می‌یابد.

چان و همکاران [5] اثر ضخامت‌های مختلف در نمودار حد شکل‌دهی ورق‌های جوش‌خورده به هم را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که هر چه نسبت ضخامت بیشتر باشد، حد شکل‌دهی کمتر خواهد بود. بران و همکاران [6] با استفاده از روش‌های تجربی و از طریق طراحی آزمایش‌های تاگوچی، به بررسی تاثیر پارامترهای شعاع سنبه، شعاع ماتریس، نیروی ورق‌گیر، روانکاری و سرعت سنبه بر توزیع ضخامت و ماکزیمم نیروی شکل‌دهی پرداختند. آن‌ها با انجام این فرآیند، به یک حالت بهینه از پارامترهای فوق به منظور کاهش نیروی شکل‌دهی و توزیع یکنواخت ضخامت دست پیدا کردند. چین و همکاران [7] برای پیش بینی شروع گلویی شدن ورق ترکیبی آلومینیومی از معیار دو شاخه‌ای شدن استفاده کردند. در تحلیل آن‌ها از یک مدل اجزای محدود همراه با یک مدل تئوری برای پیش‌بینی شکست استفاده شده بود.

پادمانابهان و همکاران [8] فرآیند کشش عمیق ورق‌های جوش‌خورده به هم، مرکب از آلومینیوم و فولاد، را مورد بررسی قرار داده و نتیجه گرفته‌اند که ترکیب این دو فلز باعث افزایش میزان شکل‌پذیری می‌گردد. یان و همکاران [9] برای جلوگیری از پارگی و چین خوردن ورق در فرآیند کشش عمیق، دمپر و سرو درایو یک مدار هیدرولیکی را طراحی و استفاده نمودند. آن‌ها با ابداع این روش، نیروی ورق‌گیر را از حالت ثابت به حالت ارتعاشی تبدیل نمودند. رودریگوئز و همکاران [10] با در نظر گرفتن فرضیه ثابت بودن حجم قطعه اولیه، با استفاده از روش عددی و المان محدود به بررسی توزیع ضخامت و شکل‌پذیری قطعه پرداختند. آن‌ها نتایج خود را با نتایج تجربی مطابقت دادند و عنوان نمودند که حدس بدست آوردن این پارامترها تا 95 درصد مورد اطمینان می‌باشد.

ساندرز و همکاران [11] با استفاده از روش شکل‌دهی سوپرپلاستیک برای ورق‌های ترکیبی تیتانیوم و آلومینیوم تولید شده با استفاده از فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی موفق به کاهش قابل توجهی از وزن یک هواپیمای بوئینگ شدند. سینک و همکاران [12] با استفاده از بررسی تجربی، شکل‌پذیری و میزان برگشت فنری ورق‌های ترکیبی را مورد ارزیابی قرار داده و به این نتیجه رسیده‌اند که استفاده از فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی میزان برگشت فنری را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد. پاتیل و همکاران [13] شبیه‌سازی فرآیند کشش عمیق را توسط نرم‌افزار انجام دادند و تاثیر پارامترهای سرعت سنبه، نیروی ورق‌گیر و ضریب اصطکاک را مورد بررسی و تحلیل قرار دادند. عباسی و همکاران [14] میزان چروکیدگی دیواره ظروف تولید شده در فرآیند کشش عمیق ورق‌های جوش‌خورده به هم را به روش عددی و تجربی مورد تحلیل قرار دادند. ایشان نشان دادند که امواج چروکیدگی تنها در ناحیه نازک‌تر به وجود آمده و چروکیدگی با توسعه سه موج شروع شده است.

تامراپ و همکاران [15] در فرآیند کشش عمیق، تاثیر فشار ورق‌گیر به

شده در این پژوهش، در "جدول 1" بیان شده است. همچنین "جدول 2" ترکیب شیمیایی آلیاژهای فولادی مورد استفاده را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه در فرآیندهای جوشکاری، صافی سطح بالا برای دستیابی به نفوذ کافی بین دو ماده بسیار مهم می‌باشد، لذا ورق‌های خارج شده از مرحله ماشینکاری، ابتدا به خوبی سنباده‌زنی و پولیش شده و سپس توسط محلول استون به خوبی شست‌وشو شده‌اند تا چربی‌ها و آلودگی‌های موجود در سطح مقطع برش کاملاً تمیز شوند. "شکل 3" آماده‌سازی سطح نمونه‌های بریده شده توسط محلول استون را نشان می‌دهد.

پس از آماده‌سازی نمونه‌ها، با توجه به جداول طراحی آزمایش، نمونه‌ها دسته‌بندی شدند و با تنظیم پارامترهای مورد نظر، عملیات جوشکاری با استفاده از دو روش اصطکاکی اغتشاشی و قوس تنگستن تحت پوشش گاز محافظ (تیگ) انجام شد. پارامترهای طراحی آزمایش‌ها در "جدول 3-4" بیان شده است.

جوشکاری تیگ روشی رایج و کارآمد در صنعت به خصوص برای ورق‌های با ضخامت کم می‌باشد. این فرآیند توسط دستگاه پیشرفته جوشکاری فرکانس بالا با توان جوشکاری 600 وات و سرعت 55 میلیمتر بر ثانیه انجام شده است. در این روش از الکتروود تنگستن خالص و فیلر هم‌جنس فلز پایه با روکش مسی استفاده شده تا جوش مستحکم‌تر و یکنواخت‌تری به دست آید. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی روشی جدید برای اتصال ورق‌های ترکیبی می‌باشد. نحوه مونتاژ و دمونتاژ ابزار استفاده شده در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در "شکل 4" نشان داده شده است. جنس این ابزار تنگستن کاربرد است و نحوه ثابت کردن حرکت دورانی این ابزار با استفاده از یک پین تعبیه شده در بدنه آن می‌باشد.

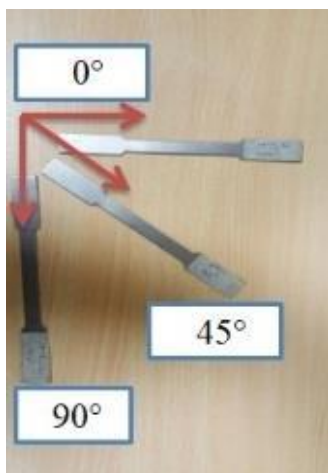


Fig. 1 Preparation of the initial samples of the tensile test

شکل 1 آماده‌سازی نمونه‌های اولیه آزمون کشش

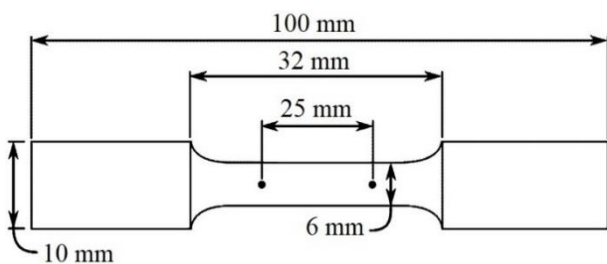


Fig. 2 Tensile test sample according to standard ASTM E8

شکل 2 نمونه آزمون کشش مطابق استاندارد ASTM E8

خطی بالاتر از 40 دور بر میلی‌متر، اثر سرعت تغییر شکل و در نسبت‌های کمتر، اثر دما بر اندازه دانه منطقه اغتشاشی غالب است.

وانگ و همکاران [28] روش جوشکاری قوس لیزر هیبریدی برای اتصال آلیاژ آلومینیوم و فولاد با مقاومت بالا توسط پرکننده برنجی را بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که خواص مکانیکی این اتصالات تحت تاثیر گرمای نسبی ورودی دو منبع حرارتی و لایه مس-روی تشکیل شده در ریزساختار می‌باشد. حداکثر بار برشی اتصال جوشکاری شده، با ایجاد این لایه حدود 20 درصد افزایش یافته بود. محمود و همکاران [29] شکل‌پذیری ورق‌های ترکیبی را بررسی کردند. آن‌ها از ورق‌های آلومینیوم سری هزار با ضخامت‌های مختلف و روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی استفاده کردند. پس از کشش عمیق نمونه‌ها، با توجه به نسبت حد ضخامت و خواص مکانیکی به دست آمده، پارامترهای بهینه جوشکاری را تعیین نمودند. مرادی و همکاران [30] جوشکاری ترکیبی تیگ و لیزر را با جوشکاری ذوبی تیگ و جوشکاری لیزر مقایسه کردند. آن‌ها بهینه‌ترین فاصله بین دو منبع حرارتی جوشکاری قوس لیزر هیبریدی را بررسی و انتخاب و تاثیر حرارت ورودی بر هندسه جوش را ارزیابی کردند. نتایج آنها نشان داد که نفوذ جوشکاری ترکیبی دو برابر بیشتر از جوشکاری تیگ و پنج برابر بیشتر از جوشکاری لیزر می‌باشد.

در این مقاله، با طراحی آزمایش‌های تجربی، تاثیر سرعت خطی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، جریان ورودی جوشکاری ذوبی تیگ و نیروی ورق‌گیر بر میزان جابجایی خط جوش و عمق کشش ورق‌های ترکیبی فولادی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین سختی ناحیه جوش حاصل از این دو فرآیند نیز اندازه‌گیری و مقایسه شده است. تحقیقات انجام شده در زمینه ارزیابی میزان عمق کشش و تاثیرات جابجایی خط جوش ایجاد شده در قطعات تولیدی با استفاده از این ورق‌های ترکیبی بسیار محدود می‌باشند. اغلب تحقیقات در زمینه ساخت و کاربرد این ورق‌ها، محدود به ارائه روابطی نظری و تجربی در ارتباط با حرکت خط جوش بعد از فرآیند شکل‌دهی می‌باشد. لذا، هدف و علت انجام این پژوهش وجود خلاء محسوس در بررسی تاثیر پارامترهایی نظیر تاثیر نوع فرآیند و پارامترهای جوشکاری و همچنین پارامترهای فرآیند کشش عمیق بر میزان عمق کشش و جابجایی خط جوش بوجود آمده در محصولات تولیدی می‌باشد. بررسی امکان تلفیق روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با روش شکل‌دهی برای ایجاد ورق‌های ترکیبی غیرهمجنس، نوآوری این پژوهش می‌باشد. نتایج این پژوهش به صورت تخصصی در تولید سازه‌هایی که به روش فرآیند کشش عمیق تولید می‌شوند و تحت تاثیر انواع تنش‌های خستگی و حرارتی قرار دارند، کاربرد خواهد داشت.

2- نمونه‌سازی تجربی

ابتدا ورق‌هایی از جنس فولاد (St14-St44-TPP) به ضخامت یک میلیمتر و به قطر 200 میلیمتر با استفاده از یک دستگاه فرز کنترل عددی چهار محوره به صورت کاملاً مشابه، برش داده شدند. سپس نمونه‌های آزمون کشش طبق استاندارد ASTM E8 برای بررسی خواص مکانیکی در سه راستای 0، 45 و 90 درجه از هر ورق به صورت جداگانه جدا شده است. این نمونه‌ها در "شکل 1" نشان داده شده‌اند. "شکل 2" نیز ابعاد نمونه استاندارد آزمون کشش را نشان می‌دهد. دستگاه مورد استفاده در آزمون کشش از نوع یونیورسال یا همه منظوره می‌باشد. آزمون کشش تک‌محوره با نرخ کرنش 0.1 بر ثانیه انجام گرفته است. "شکل 4" نمونه تحت آزمون کشش را نشان می‌دهد. خواص مکانیکی به دست آمده از آزمون کشش برای ورق‌های فولادی استفاده

جدول 1 خواص مکانیکی فولادهای St14-St44-TPP

90 درجه	TPP 45 درجه	0 درجه	90 درجه	St44 45 درجه	0 درجه	90 درجه	St14 45 درجه	0 درجه	خواص مکانیکی (واحد)
270	285	270	285	300	280	180	240	230	تنش تسلیم (MPa)
520	500	520	520	500	350	410	420	350	تنش نهایی (MPa)
210	210	210	210	210	210	210	210	210	مدول الاستیک (GPa)
7800	7800	7800	7800	7800	7800	7800	7800	7800	چگالی (kg/m ³)
0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	ضریب پواسون

جدول 2 ترکیب شیمیایی فولادهای St14-St44-TPP

گوگرد	فسفر	منیزیم	سیلیسیم	نیتروژن	کربن	آلومینیوم	نوع و درصد عناصر آلیاژی
-	-	-	-	-	0.08	0.2	St14
0.04	0.04	1.6	0.55	0.009	0.21	-	St44
-	-	-	-	0.07	0.1	-	TPP

بعد از انجام فرآیند جوشکاری نیز به دلیل جلوگیری از آسیب رسیدن به بدنه قالب، نمونه‌ها با استفاده از سنگ سنباده نرم پولیش کاری شدند. عملیات سنباده‌زنی تنها برای ورق‌های جوشکاری شده با استفاده از فرآیند جوشکاری ذوبی انجام می‌شود. زیرا به دلیل استفاده از فیلر، ناحیه اتصال پس از سنباده‌زنی به میزان کمتری آسیب خواهد دید. در صورتی که اگر این عملیات برای ورق‌هایی که با استفاده از فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی تولید شده‌اند انجام گیرد، ناحیه جوش به شدت آسیب‌پذیرتر خواهد شد. دلیل این امر این است که ضخامت ورق‌ها در ناحیه جوش اصطکاکی اغتشاشی بیشتر تحت تاثیر قرار گرفته است.

پس از آماده‌سازی نمونه‌های جوشکاری شده، به منظور انجام عملیات کشش عمیق، ابتدا سنبه و ماتریس در نرم‌افزار کتیا طراحی شده و قالب کشش مورد نظر ساخته شده است. "شکل 5" سنبه و ماتریس قالب کشش عمیق را نشان می‌دهد. سپس نمونه‌ها در قالب‌های کشش عمیق قرار داده شده‌اند. پارامترهای ورودی فرآیند طبق جدول طراحی آزمایش تنظیم و آزمایش‌ها انجام شده است. فرآیند کشش عمیق در دستگاه پرس مولر با تناژ 315 تن و با سرعت 66 میلی‌متر بر ثانیه انجام گردیده است.

در این پژوهش، برای اندازه‌گیری حرکت و جابه‌جایی خط جوش از تکنیک عکس برداری و نرم‌افزار شبیه‌سازی کتیا استفاده شده است. روش کار بدین صورت بود که کولیس را به اندازه معین باز کرده و در کنار قطعه قرار داده شده است. سپس توسط دوربینی که در فاصله معین از قطعه قرار دارد از نمونه عکس گرفته شده و عکس در نرم‌افزار کتیا وارد شده است. با در نظر گرفتن اندازه واقعی کولیس و مقدار اندازه‌گیری شده، یک ضریب تصحیح به



Fig. 3 Preparation of the surface of the samples by acetone
شکل 3 آماده‌سازی سطح نمونه‌های بریده شده توسط استون

جدول 3 جدول طراحی آزمایش نمونه‌های جوشکاری اصطکاکی

کد نمونه	جنس نمونه	نیروی ورق‌گیر (تن)	سرعت دورانی (دور بر دقیقه)	سرعت خطی (میلی‌متر بر دقیقه)	زاویه ابزار (درجه)
A	St14-TPP	10	1200	60	3
B	St14-St44	15	1200	80	3
C	St14-TPP	10	1200	50	3
D	St14-St44	15	1200	60	3

جدول 4 جدول طراحی آزمایش نمونه‌های جوشکاری ذوبی

کد نمونه	جنس نمونه	نیروی ورق‌گیر (تن)	جریان ورودی (آمپر)	سرعت خطی (میلی‌متر بر دقیقه)
A'	St14-St44	15	30	55
B'	St14-St44	15	25	55
A''	St14-TPP	15	30	55
B''	St14-TPP	15	25	55



Fig. 4 Assembly and demounting of the friction welding tool
شکل 4 مونتاژ و دهمونتاژ ابزار جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

نظیر نیروی ورق‌گیر، اصطکاک، کیفیت خط جوش و... انجام می‌شود. جابه‌جایی خط جوش پس از کشش عمیق برای نمونه‌های جوشکاری اصطکاکی و ذوبی به ترتیب در "شکل‌های 9-10" نشان داده شده است. "جدول 5-6" نیز مقادیر جابه‌جایی خط جوش و عمق کشش را نشان می‌دهند.

پس از انجام فرآیند کشش عمیق، با توجه به تنش‌های اعمالی، خط جوش از موقعیت اصلی خود به یک سمت منحرف می‌شود. جابه‌جایی خط جوش را می‌توان بر اساس ماهیت تنش در ورق، توجیه کرد. عامل مؤثر در جابه‌جایی خط جوش مؤلفه‌های تنش است که عمود بر خط جوش اعمال

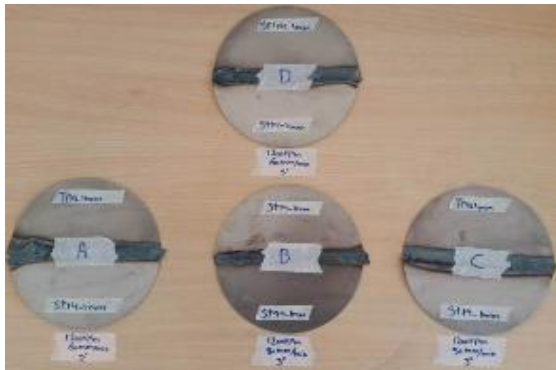


Fig. 7 Final samples frictions stir welding

شکل 7 نمونه‌های نهایی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

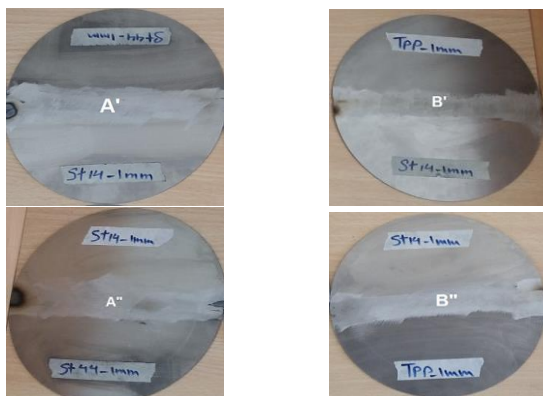


Fig. 8 Final sample of TIG welding

شکل 8 نمونه‌های نهایی جوشکاری ذوبی

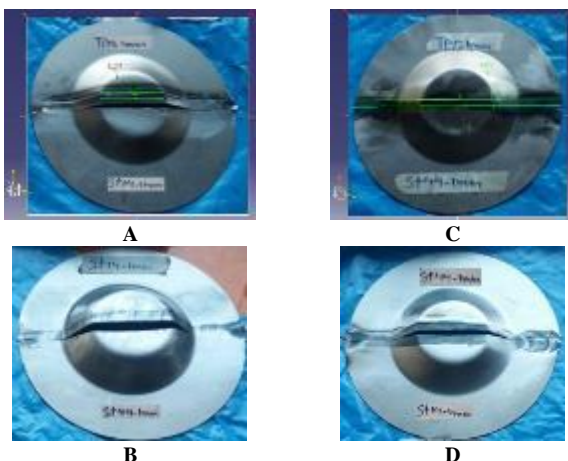


Fig. 9 The welding line movement of friction stir welding samples

شکل 9 جابه‌جایی خط جوش نمونه‌های جوشکاری اصطکاکی

دست آورده و با استفاده از این ضریب تصحیح مقدار جابه‌جایی خط جوش به دست آمده است. همچنین برای اندازه‌گیری عمق کشش نمونه‌ها از کولیس ارتفاع سنج استفاده شده که در "شکل 6" نشان داده شده است.

در این مقاله، از آزمون سختی راکول برای سختی‌سنجی نمونه‌ها استفاده شده است. دلیل پذیرش عمومی این آزمایش، سرعت آن، عدم امکان بروز خطا از طرف شخص، قابلیت تشخیص تغییرات کوچک سختی در فولاد سخت شده، کوچک بودن اندازه فرورفتگی و عدم صدمه دیدن قطعات است. این آزمون‌ها تحت شرایط استاندارد آزمایشگاهی ISO 6508 انجام گرفته‌اند. نمونه‌های مورد آزمون به صورتی انتخاب شده‌اند که هم تاثیر نوع فرآیندهای جوشکاری و هم تاثیر پارامترهای جوشکاری مورد ارزیابی قرار داده شوند. پس از اندازه‌گیری سختی در هر ناحیه از جوش، تبدیل‌های سختی انجام شده و سختی راکول به سختی معادل برینل و سپس سختی ویکرز تبدیل و بازنویسی شده است.

3- بحث و نتایج

نمونه‌های نهایی جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی و ذوبی به ترتیب در "شکل‌های 7-8" نشان داده شده است. یکی از پارامترهای بحرانی و معایب مخرب در شکل‌دهی ورق‌های ترکیبی، حرکت و جابه‌جایی خط جوش از موقعیت اصلی خود پس از انجام فرآیند کشش عمیق می‌باشد. تخمین میزان جابه‌جایی خط جوش تاثیر مستقیمی بر روی تخمین شکل‌پذیری ورق خواهد داشت. جابه‌جایی خط جوش باعث تغییر در کرنش پلاستیک ناحیه اتصال و به دنبال آن ایجاد یک ناحیه مستعد برای شروع شکست خواهد بود. کنترل این میزان جابه‌جایی با استفاده از پارامترهای

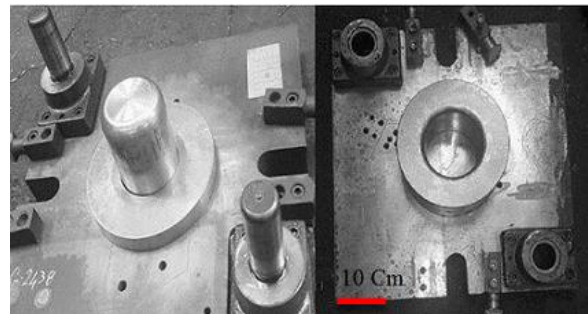


Fig. 5 Punch and matrix deep drawing mold

شکل 5 سنبه و ماتریس قالب کشش عمیق



Fig. 6 Depth measurement of samples

شکل 6 اندازه‌گیری عمق کشش نمونه‌ها

پدیده تنش سیلان پایین فلز با استحکام کمتر است و خط جوش به سمت فلز با استحکام بالاتر حرکت می‌کند [31]. جابه‌جایی خط جوش در این نمونه A بیشتر از C است. با افزایش 10 درصدی سرعت خطی، جابه‌جایی خط جوش حدود 34 درصد افزایش یافته است. پس با افزایش سرعت خطی، جابه‌جایی خط جوش نیز افزایش می‌یابد. دلیل این امر، کاهش امکان نفوذ و در نتیجه کاهش کیفیت جوشکاری می‌باشد. این جابه‌جایی باعث می‌شود تا قطعات تولیدی در این نواحی به علت ایجاد کرنش‌های پلاستیک محلی بیشتر مستعد شکست و پارگی باشند. کنترل این پارامتر به پیش‌بینی ناحیه شکست در قطعات تولید شده کمک بسزایی خواهد کرد [32]. در مورد نمونه‌های A و C، توجه به این نکته حائز اهمیت است که نیروی ورق‌گیر کمتر و جابه‌جایی خط جوش بیشتر، باعث ایجاد چروکیدگی در ناحیه فلنج ورق‌ها شده است.

در نمونه‌های B و D، جدایش اتصال از ناحیه جوش رخ داده است. نیروی ورق‌گیر در این نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های A و C افزایش یافته است. با افزایش نیروی ورق‌گیر میزان جابه‌جایی خط جوش کاهش یافته است، زیرا افزایش نیروی ورق‌گیر از نفوذ ورق به داخل حفره قالب به دلیل افزایش اصطکاک بین ورق با اجزای قالب جلوگیری می‌کند لذا این افزایش اصطکاک باعث می‌شود جریان مواد به داخل حفره کاهش یابد. همچنین با افزایش نیروی ورق‌گیر تنش اعمال شده به ورق باعث افزایش تنش سیلان می‌شود و به دنبال آن عمق کشش نیز افزایش می‌یابد.

با توجه به "جدول 4"، نمونه‌های A' و B' و نمونه‌های A'' و B'' مربوط به روش جوشکاری ذوبی، در شرایط یکسان و با جریان متفاوت مورد ارزیابی قرار داده شده‌اند. نتایج "جدول 6" بیان می‌کنند که میزان عمق کشش در نمونه A' بیشتر از نمونه B' و در نمونه A'' بیشتر از نمونه B'' است. با افزایش 25 درصدی جریان جوشکاری در اتصال St14-St44، عمق کشش حدود 34 درصد افزایش یافته است. همچنین با افزایش 25 درصدی جریان جوشکاری در اتصال St14-TPP، عمق کشش حدود 19 درصد افزایش یافته است. طبق نتایج به دست آمده، مقدار جابه‌جایی خط جوش در نمونه A' کمتر از نمونه B' و در نمونه A'' کمتر از نمونه B'' است. با افزایش 25 درصدی جریان جوشکاری در اتصال St14-St44، جابه‌جایی خط جوش حدود 23 درصد کاهش یافته است. همچنین با افزایش 25 درصدی جریان جوشکاری در اتصال St14-TPP، جابه‌جایی خط جوش حدود 47 درصد کاهش یافته است.

نتایج فوق نشان می‌دهد که با افزایش جریان ورودی در روش جوشکاری ذوبی تیگ، جنس نمونه‌ها بر میزان افزایش عمق کشش و کاهش جابه‌جایی خط جوش تأثیر زیادی دارد. در همه نمونه‌ها به علت تفاوت استحکام دو فلز پایه، حرکت خط جوش به سمت فلز با استحکام تسلیم بالاتر رخ داده است. با افزایش جریان جوشکاری، مقدار عمق کشش در نمونه افزایش یافته است ولی میزان جابه‌جایی خط جوش در نمونه کاهش یافته است. زیرا با افزایش جریان جوشکاری، حرارت ورودی به ناحیه جوش بیشتر می‌شود، در نتیجه مذاب همگن‌تری به وجود می‌آید و باعث دانه ریز شدن ساختار ناحیه جوش می‌شود. این مقدار جریان، دارای یک حالت بهینه است که عبور از این مقدار باعث شکست دانه‌ها، ترد شدن بیش از حد ناحیه جوش و تفاوت ساختار متالورژیکی بیش از حد بین دو منطقه نفوذ و منطقه متأثر از حرارت می‌شود. نتیجه این موضوع، افزایش تنش‌های محلی در این ناحیه و رشد ترک و شکست از ناحیه متأثر از حرارت است. در واقع ورق دچار ترد شدگی بیش از

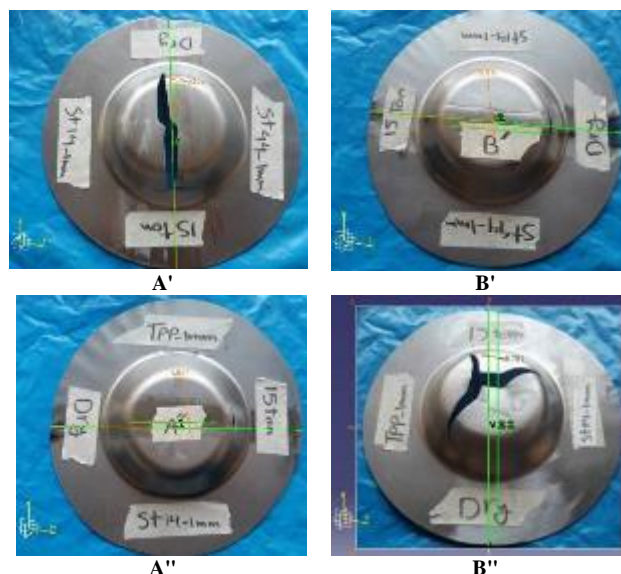


Fig. 10 The welding line movement of TIG welding samples

شکل 10 جابه‌جایی خط جوش نمونه‌های جوشکاری ذوبی

جدول 5 نتایج کشش عمیق نمونه‌های جوشکاری اصطکاکی

Table 5 Deep drawing results of friction welding examples

کد نمونه	عمق کشش (میلیمتر)	جابه‌جایی خط جوش (میلیمتر)
A	17.2	8.37
B	20.35	جدایش از ناحیه جوش
C	15.31	6.23
D	15.45	جدایش از ناحیه جوش

جدول 6 نتایج کشش عمیق نمونه‌های جوشکاری ذوبی

Table 6 Deep drawing results of TIG welding examples

کد نمونه	عمق کشش (میلیمتر)	جابه‌جایی خط جوش (میلیمتر)
A'	20.11	5.10
B'	15	6.65
A''	24.07	4.63
B''	20.18	8.87

می‌شود. به دلیل اینکه تنش‌های کششی در طول خط جوش در مرکز از دیواره بیشتر است، پس میزان حرکت خط جوش از دیواره‌ها به سمت مرکز ورق افزایش می‌یابد. همچنین در ناحیه فلنج چون تنش از نوع فشاری است، لذا خط جوش به سمت ماده نازک‌تر حرکت می‌کند [20].

با توجه به "جدول 3"، نمونه‌های A و C و نمونه‌های B و D مربوط به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، در شرایط یکسان و با سرعت خطی متفاوت مورد ارزیابی قرار داده شده‌اند. نتایج "جدول 5" نشان می‌دهند که میزان عمق کشش در نمونه A بیشتر از نمونه C و در نمونه B بیشتر از نمونه D است. با افزایش 10 درصدی سرعت خطی، عمق کشش حدود 12 درصد افزایش یافته است. همچنین با افزایش 33 درصدی سرعت خطی، عمق کشش حدود 32 درصد افزایش یافته است. زیرا با افزایش سرعت خطی، سرعت سرد شدن مذاب افزایش یافته و باعث تشکیل فاز سخت‌تر شده است. این تغییر در نهایت باعث افزایش سختی ناحیه جوش و در نتیجه افزایش عمق کشش می‌شود. در نمونه A، حرکت خط جوش به سمت فلز با استحکام تسلیم بالاتر رخ داده که همین اتفاق در نمونه C نیز رخ داده است. دلیل این

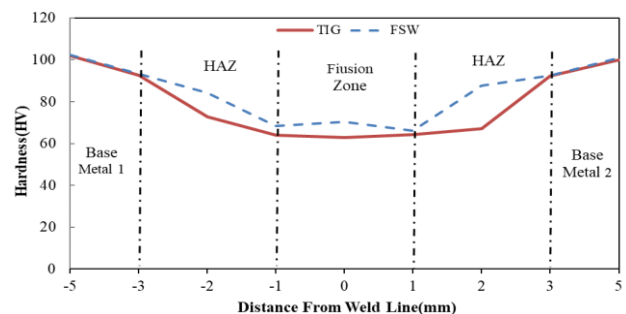
اندازه می‌شود و ناحیه جوش مستعد پارگی شکست خواهد بود.

با توجه به "جداول 3-6"، مقایسه نمونه‌های B و D از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و نمونه‌ها A' و B' از جوشکاری ذوبی تیگ با جنس و نیروی ورق گیر یکسان مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند که عمق کشش برای نمونه‌های حاصل از این دو روش تقریباً برابر می‌باشد ولی با توجه به جابه‌جایی خط جوش، روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نتایج بهتری را بدست می‌دهد. البته در نمونه‌های جوشکاری شده با این روش، جدایش و شکست از ناحیه جوش بوده است. در نتیجه در کشش عمیق نمونه‌های جوشکاری شده با روش اصطکاکی اغتشاشی، طراحی اتصال ناحیه جوش باید با ضریب اطمینان بیشتری انجام گردد. در مواقعی که ضخامت ورق‌های ترکیبی کم باشد، به دلیل اعمال کرنش‌های شدید مکانیکی و حرارتی به قطعه در حالت جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، نمونه در ناحیه جوش، ضعیف‌تر می‌شود. بنابراین استفاده از جوشکاری ذوبی تیگ در حالت ورق‌های با ضخامت کم نتیجه مطلوب‌تری دارد، زیرا با استفاده از فیلر ناحیه جوش تقویت می‌شود و پارگی دیرتر رخ خواهد داد. به طور کلی در کشش عمیق ورق‌های اتصال‌دهی شده با استفاده از فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، مقدار چروکیدگی و اعوجاج کمتر می‌باشد.

نمودار نتایج سختی‌سنجی نمونه‌های جوشکاری شده توسط روش‌های اصطکاکی اغتشاشی و ذوبی تیگ، بر حسب سختی ویکرز نسبت به فاصله از خط جوش به صورت مقایسه‌ای در "شکل 11" نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سختی ناحیه جوش اصطکاکی اغتشاشی بیشتر از سختی ناحیه مربوط به جوش ذوبی تیگ می‌باشد. زیرا به دلیل اعمال کرنش‌های پلاستیک بسیار شدید در ناحیه جوش، ساختار متالورژیکی این ناحیه بهبود پیدا کرده و اندازه دانه‌های ناحیه نفوذ در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی کوچک شده و سختی این ناحیه نسبت به جوشکاری ذوبی بیشتر شده است.

4- نتیجه‌گیری

- 1- با افزایش 10 درصدی و 33 درصدی سرعت خطی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، عمق کشش به ترتیب در حدود 12 و 32 درصد افزایش یافته و جابه‌جایی خط جوش حدود 34 درصد افزایش یافته است.
- 2- با افزایش 25 درصدی جریان جوشکاری ذوبی تیگ، عمق کشش اتصال St14-St44 حدود 34 درصد افزایش یافته و عمق کشش اتصال St14-TPP حدود 19 درصد افزایش یافته است.
- 3- با افزایش 25 درصدی جریان جوشکاری ذوبی تیگ، جابه‌جایی خط جوش اتصال St14-St44 حدود 23 درصد کاهش یافته و برای اتصال



شکل 11 مقایسه سختی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و ذوبی تیگ

- 4- با در نظر گرفتن جنس و نیروی ورق گیر یکسان، عمق کشش برای نمونه‌های حاصل از این دو روش تقریباً برابر می‌باشد ولی با توجه به جابه‌جایی خط جوش، روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نتایج بهتری را بدست می‌دهد.
- 5- سختی ناحیه جوش اصطکاکی اغتشاشی بیشتر از سختی ناحیه مربوط به جوش ذوبی قوس تنگستن می‌باشد.
- 6- با افزایش نیروی ورق‌گیر نمونه‌های جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و در نتیجه کاهش میزان جابه‌جایی خط جوش، چروکیدگی کمتری در ناحیه فلنج ورق‌ها مشاهده شده است. مقدار چروکیدگی و اعوجاج این روش کمتر می‌باشد.
- 7- در نمونه‌های جوشکاری شده با روش اصطکاکی اغتشاشی، جدایش و شکست از ناحیه جوش بوده است. در نتیجه در کشش عمیق نمونه‌های جوشکاری شده با این روش، طراحی اتصال ناحیه جوش باید با ضریب اطمینان بیشتری انجام گردد.
- 8- در مواقعی که ضخامت ورق‌های ترکیبی کم باشد، به دلیل اعمال کرنش‌های شدید مکانیکی و حرارتی به قطعه در حالت جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، نمونه در ناحیه جوش ضعیف‌تر می‌شود. بنابراین استفاده از جوشکاری ذوبی تیگ در حالت ورق‌های با ضخامت کم نتیجه مطلوب‌تری دارد، زیرا با استفاده از فیلر ناحیه جوش تقویت می‌شود.

5- مراجع

- [1] B. Kinsey, N. Song, J. Cao, Analysis of clamping mechanism for tailor welded blank forming, *Society of Automotive Engineering*, Paper No. 1999-01-3192, 1999.
- [2] M. F. Shi, K. Pickett, M. Bhatt, Formability issues in the application of tailor welded blank sheet, *Society of Automotive Engineering*, Paper No. 930278, 1993.
- [3] M. F. Shi, M. Eisenmenger, K. K. Bhatt, Influence of laser welding parameters on formability and robustness of blank manufacturing: an application to a body side frame, *Society of Automotive Engineering*, Paper No. 950922, 1995.
- [4] Y. M. Heo, S. H. Wang, H. Y. Kim, D. G. Seo, The effect of the drawbead dimensions on the weld-line movements in the deep drawing of tailor-welded blanks, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 113, No. 1-3, pp. 686-691, 2001.
- [5] S. M. Chan, L. C. Chan, T. C. Lee, Tailor-welded blanks of different thickness ratios effects on forming limit diagrams, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 132, No. 1-3, pp. 95-101, 2003.
- [6] M. T. Browne, M. T. Hillery, Optimising the variables when deep-drawing C.R.1 cups, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 136, No. 1-3, pp. 64-71, 2003.
- [7] W. Y. Chien, J. Pan, S. C. Tang, A combined necking and shear localization analysis for aluminum sheets under biaxial stretching condition, *International Journal of Plasticity*, Vol. 20, No. 11, pp. 1953-1981, 2004.
- [8] R. Padmanabhan, A. J. Baptista, M. C. Oliveira, L. F. Menezes, Effect of anisotropy on the deep-drawing of mild steel and dual-phase steel tailor-welded blanks, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 184, No. 1-3, pp. 288-293, 2007.
- [9] Y. W. Yun, H. S. Bae, M. K. Park, A study of the control of the blank holding force using an MR damper in a drawing press, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 24, No. 11, pp. 2281-2288, 2010.
- [10] D. M. Rodrigues, C. Leitão, L. F. Menezes, A multi-step analysis for determining admissible blank-holder forces in deep-drawing operations, *Materials and Design*, Vol. 31, No. 3, pp. 1475-1481, 2010.
- [11] D. Sanders, P. Edwards, G. Grant, M. Ramulu, Superplastically formed friction stir welded tailored aluminum and titanium blanks for aerospace applications, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 19, No. 4, pp. 515-520, 2010.
- [12] J. Sinke, C. Iacono, A. A. Zadpoor, Tailor made blanks for the aerospace industry, *International Journal of Material Forming*, Vol. 3, No. 1, pp. 849-852, 2010.
- [13] S. Patil, R. G. Tated, Formability nalysis for trapezoidal cup forming using hyperform, *Hyperworks Technology Conference*, Pune, India, August 4-5, 2011.
- [14] M. Abbasi, M. Ketabchi, T. Labudde, U. Prah, New attempt to wrinkling

- [24] J. Han, S.H. Natsume, S. Kitayama, K. Yamazaki, Optimization of pulsating blank holder force for deep drawing of cylindrical cups, *11th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimisation*, Sydney, Australia, June 12-14, 2015.
- [25] M. Moradi, M. Ghoreishi, A. Rahmani, Numerical and experimental study of geometrical dimensions on laser-TIG hybrid welding of stainless steel 1.4418, *Journal of Modern Processes in Manufacturing and Production*, Vol. 5, No. 2, pp. 21-31, 2016.
- [26] J. S. Dias, T. C. Chuvras, M. P. C. Fonseca, Evaluation of residual stresses and mechanical properties of IF steel welded joints by laser and plasma processes, *Materials Research*, Vol. 19, No. 3, pp. 1980-5373, 2016.
- [27] M. M. Moradi, H. Jamshidi Aval, R. Jamaati, Experimental investigation on the effect of friction stir welding process parameters in dissimilar joining of AA2024-T351 and AA6061-T6 aluminum alloys, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 9, pp. 394-402, 2016. (in Persian فارسی)
- [28] H. Wang, B. Feng, G. Song, L. Liu, Laser-arc hybrid welding of high-strength steel and aluminum alloy joints with brass filler, *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 33, No. 7, pp. 735-742, 2017.
- [29] E. A. Mahmoud, K. A. M. Ragab, N. E. Mohamed, Experimental investigation of formability of Al-1050 tailor-welded blanks, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 89, No. 1-4, pp. 791-801, 2017.
- [30] M. Moradi, M. Ghoreishi, A. Khorram, Process and outcome comparison between laser, tungsten inert gas (TIG) and laser-TIG hybrid welding, *Lasers in Engineering*, Vol. 39, No. 3-6, pp. 379-391, 2018.
- [31] V. T. Meinders, H. Huetink, A. Berg, Deep drawing simulations of tailored blanks and experimental verification, *International Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 103, No. 1, pp. 65-73, 2000.
- [32] R. M. Leal, B. M. Chaparro, J. M. Antunes, P. Vilaça, Mechanical behaviour of fsw aluminium tailored blanks, *Materials Science Forum*, Vol. 587, No. 1, pp. 961-965, 2008.
- behavior analysis of tailor welded blanks during the deep drawing process, *Materials and Design*, Vol. 40, No. 1, pp. 407-414, 2012.
- [15] S. Tommerup, S. Endelt, Experimental verification of a deep drawing tool system for adaptive blankholder pressure distribution, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 212, No. 11, pp. 2529-2540, 2012.
- [16] B. V. S. Rao, P. V. R. Ravindra, G. Chandra, G. Krishna, Optimization of blank holding force in deep drawing of cylindrical cups using taguchi approach, *International Journal of Engineering and Innovative Technology*, Vol. 2, No. 3, pp. 2277-3754, 2012.
- [17] R. Venkat, T. A. Janardhan, Effect of various parameters on the wrinkling in deep drawing cylindrical cups, *International Journal of Engineering Trends and Technology*, Vol. 3, No. 1, pp. 2231-5381, 2012.
- [18] A. Fazli, Optimum tailor-welded blank design using deformation path length of boundary nodes, *International Journal of Automotive Engineering*, Vol. 3, No. 2, pp. 10-21, 2013.
- [19] H. Ziaei Poor, H. Moosavi, Prevent of wrinkling and rupturing using a new method based on punch force in hydro-mechanical deep drawing process, *Journal of Mechanic Systems Engineering*, Vol. 3, No. 3, pp. 125-128, 2013.
- [20] R. Safdarian Korouyeh, H. Moslemi Naeini, M. G. Torkamany, H. Liaghat, Experimental and theoretical investigation of thickness ratio effect on the formability of tailor welded blank, *Optics & Laser Technology*, Vol. 51, No. 1, pp. 24-31, 2013.
- [21] R. T. Nirav, Effects of various parameters in deep drawing process over sheet metal to get optimum result, *International Journal of Engineering Development and Research*, Vol. 2, No. 4, pp. 2321-9939, 2014.
- [22] N. Kotkunde, A. D. Deole, A. K. Gupta, Prediction of forming limit diagram for Ti-6Al-4V alloy using artificial neural network, *Procedia Materials Science*, Vol. 6, No. 1, pp. 341-346, 2014.
- [23] Y. Song, L. Hua, Influences of thickness ratio of base sheets on formability of tailor welded blanks, *Procedia Engineering*, Vol. 81, No. 1, pp. 730-735, 2014.