مجله مهندسی ساخت و تولید ایران، آذر 1398، دوره 6، شماره 6، ص.ص. 25- 33

ماه‌نامه علمی پژوهشی

مهندسی ساخت و تولید ایران

www.smeir.org

بررسی تجربی شکل‌پذیری ورق‌های فولادی جوش‌دوخت شده به کمک لیزر در فرایند شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای

روح‌اله پناهی لیاولی[1]، محمد بخشی جویباری[2*]، حمید گرجی[3]، محمد جواد میر نیا[4]

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، مرکز پژوهشی فرایندهای نوین شکل‌دهی مواد، دانشگاه صنعتی بابل، بابل

2- استاد، مهندسی مکانیک، مرکز پژوهشی فرایندهای نوین شکل‌دهی مواد، دانشگاه صنعتی بابل، بابل

3- دانشیار، مهندسی مکانیک، مرکز پژوهشی فرایندهای نوین شکل‌دهی مواد، دانشگاه صنعتی بابل، بابل

4- استادیار، مهندسی مکانیک، مرکز پژوهشی فرایندهای نوین شکل‌دهی مواد، دانشگاه صنعتی بابل، بابل

* بابل، صندوق پستی 4849، bakhshi@nit.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 2 دی 1397

پذیرش: 25 اسفند 1397

ارائه در سایت: آبان 1398

کلیدواژگان:

شکل‌پذیری

شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای

ورق‌های ترکیبی

چکیده

ورق‌های جوش‌دوخت شده از اتصال لب به لب ورق‌های پایه به روش‌های مختلف جوش‌کاری تولید می‌شوند. این ورق‌ها تحت عنوان ورق‌های ترکیبی یا جوش‌دوخت شده وجود داشته و به دلیل مزایای متعدد، کاربردهای فراوانی در بخش‌های مختلف صنعت پیدا کرده‌اند. در این پژوهش، شکل‌پذیری و تأثیر راستای خط جوش ورق‌های جوش‌دوخت شده توسط لیزر از جنس‌های St12 و St14 به ضخامت‌های 1 و 1/5 میلی‌متر در فرایند شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای قطعاتی به فرم هرم ناقص، مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا بیشترین عمق قابل شکل‌دهی در شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای یک هرم ناقص از هر کدام از ورق‌های پایه به ازای مقادیر مختلف زاویه دیواره به‌دست آمد و زاویه دیواره بحرانی برای هر کدام از آن‌ها تعیین شد. سپس، شکل‌دهی تدریجی هرم ناقص با استفاده از ورق‌های جوش‌دوخت شده در محدوده زاویه دیواره بحرانی ورق‌های پایه انجام گردید. در این راستا، ورق‌های ترکیبی با چیدمان و ترکیب‌های مختلف از ورق‌های پایه در نظر گرفته شد. جهت بررسی تأثیر راستای خط جوش در عمق شکل‌دهی، هر ترکیب با دو راستای خط جوش 0 و 45 درجه نسبت به جهت نورد تهیه گردید. نتایج آزمایش نشان داد که عمق پارگی ورق‌های جوش‌دوخت شده در راستای 45 درجه، نسبت به ورق‌های با خط جوش در راستای نورد بطور میانگین 14 درصد کاهش یافت. همچنین، میانگین عمق شکل‌دهی ورق‌های جوش‌دوخت شده در زاویه متوسط حد بحرانی دیواره ورق‌های پایه به حدود 25 درصد ورق‌های پایه کاهش می‌یابد. بنابراین، ورق‌های ترکیبی باید در زاویه دیواره حد بحرانی خودشان شکل‌دهی شوند.

Experimental investigation of formability of laser tailor welded steel blanks in single point incremental forming

Rohallah Panahi Liavoli, Mohammad Bakhshi Jooybari*, Hamid Gorji, Mohammad Javad Mirnia

Advanced Material Forming Research Center, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

* P.O.B. 484, Babol, Iran, bakhshi@nit.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received 23 December 2018

Accepted 15 March 2019

Available October 2019

Keywords:

Formability

Single Point Incremental Forming

TWBs

Abstract

Welded sheets are made by butt connecting of the base plates in various welding methods. These sheets are called welded sheets, tailor welded blanks (TWBs).Due to their many benefits, they have found many uses in various parts of the industry. In this Research, the formability and effect of weld line of TWBs of St12 and St14 in thicknesses of 1 mm and 1.5 mm in single point incremental forming in the form of a truncated pyramid has been investigated. At first, the maximum depth that can be shaped in single point incremental forming of a truncated pyramid from each of the base plates for different values of wall angle was obtained and the critical wall angle for each of them was determined. Then, the incremental forming of the truncated pyramid was done using welded sheets at the critical wall angle of the base plates. In this regard, TWBs were considered with different layouts and combinations of base plates. To investigate the effect of weld line on forming depth, each combination was prepared in two weld directions of 0 and 45^0 relative to the rolling direction. The experiment results showed that the fracture depth of TWBs with 45^0 was reduced by an average of 14% compared to TWBs in the rolling direction. Furthermore, the average depth of the TWBs at the average critical wall angle of the base plates decreases to about 25% compared to the base plates. Therefore, the TWBs should be formed at their critical wall angles.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

R. Panahi Liavoli, M. Bakhshi Jooybari, H. Gorji, M. J. Mirnia, Experimental investigation of formability of laser tailor welded steel blanks in single point incremental forming, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 6, No. 6, pp. 25- 33, 2019 (in Persian)

1- مقدمه

امروزه به کارگیری سیستم‌های کنترل عددی کامپیوتری در شکل‌دهی ورق پایه و ترکیبی[1] و همچنین استفاده از ورق‌های ترکیبی به جای ورق تک لایه، یک راه حل اساسی برای ایجاد تنوع در مدل هندسی، تهیه سریع نمونه، کاهش وزن و هزینه تمام شده قطعات می‌باشد. شکل‌دهی تدریجی ورق[2]، نمونه بارز این روش‌ها می‌باشد. این فرایند اولین بار به عنوان تکنولوژی شکل‌دهی بدون قالب توسط ماتسوبارا [1] در اوایل سال 1990 در کشور ژاپن معرفی شد. امروزه این روش برای تعداد کم و تنوع محصولات بالا، در صنعت پیشنهاد می‌شود. ورق‌های ترکیبی متشکل از دو یا چند ورق با ضخامت، خواص و حتی پوشش متفاوت می‌باشند که به صورت لب به لب به هم متصل شده و سپس به وسیله یکی از فرایندهای شکل‌دهی به فرم نهایی قطعه تبدیل می‌گردند. پژوهش‌های انجام شده در گذشته در زمینه ISF، بیشتر بر روی ورق‌های تک لایه صورت گرفته است، ولی امروزه تقاضا برای استفاده از ورق‌های جوش‌دوخت شده، خصوصاً در صنعت خودرو و هوا فضا روز به روز در حال افزایش است. نمونه‌ای از کاربرد ورق ترکیبی در تولید بدنه خودرو در شکل 1 نشان داده شده است که در آن ورق‌های با ضخامت‌های مختلف به‌هم جوش شده‌اند. قسمت‌هایی از درب خودرو که نیاز به استحکام بیشتری دارد، دارای ضخامت بیشتر و آن قسمت‌هایی که نیاز به تحمل بار زیادی ندارد، دارای ضخامت کمتر می‌باشد. متفاوت بودن خواص مکانیکی و ضخامت هریک از ورق‌ها و همچنین روش اتصال آن‌ها به یکدیگر، سبب بروز مشکلاتی در شکل‌دهی این گونه ورق‌ها شده است.

فرایند ISF با توجه به نحوه تماس ورق با ابزار به دو روش تک نقطه‌ای و دو نقطه‌ای تقسیم می‌شود که در این بررسی شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای[3] هرم ناقص از ورق‌های پایه و جوش‌دوخت شده توسط لیزر مورد توجه قرار گرفته است. شکل 2 شماتیک SPIF ورق فلزی با زاویه دیواره ثابت ψ را نشان می‌دهد [3]. تجهیزات مورد نیاز در این فرایند شامل یک ابزار ساده سر کروی، فیکسچر مخصوص نگهداری ورق و یک فرز CNC سه محوره می‌باشد. در این فرایند ابتدا ورق با استفاده از یک فیکسچر مخصوص مهار می‌شود و سپس با حرکت یک ابزار استوانه‌ای سرکروی بسته شده بر روی یک فرز کنترل عددی در یک مسیر برنامه ریزی شده، به تدریج به شکل مورد نظر در می‌آید [4].

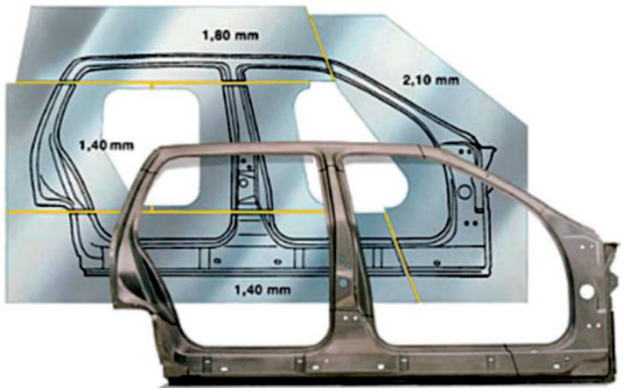

Fig. 1 Example of the use of TWBs in car door production [2]

شکل 1 نمونه‌ای از کاربرد ورق ترکیبی در تولید درب خودرو [2]

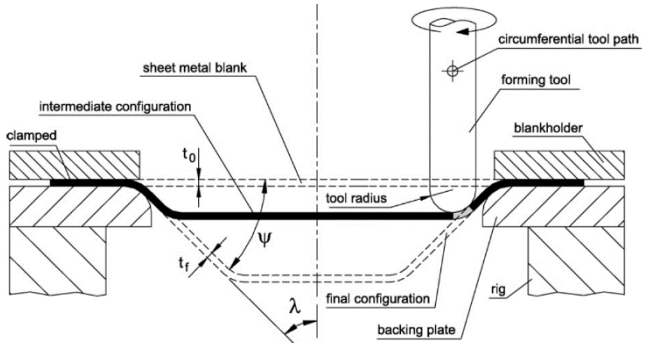

Fig. 2 The overall schematic of SPIF [3]

شکل 2 شماتیک شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای [3]

برای جلوگیری از پاره شدن ورق و همچنین برای اینکه ورق بهتر شکل بگیرد، در زیر ورق یک صفحه پشتیبان[4] و در بالای ورق، ورق‌گیر[5] قرار می‌گیرد و لبه‌های ورق توسط ورق‌گیر مهار می‌شود. برنامه مسیر حرکت ابزار توسط نرم‌افزارهای ساخت به کمک کامپیوتر تهیه می‌شود. در روش SPIF زیر ورق خالی است و ابزار فقط از بالای ورق با آن تماس داشته و به آن نیرو وارد می‌کند. به این دلیل به این روش، تک نقطه‌ای و منفی نیز گفته می‌شود.

پژوهش‌هایی در خصوص شکل‌پذیری ورق‌های ترکیبی، SPIF ورق تک لایه و SPIF ورق‌های ترکیبی از قبل صورت گرفته است. هر چند نتایج تحقیقات به دست آمده درSPIF ورق تک لایه برای SPIF ورق‌های ترکیبی قابل به کارگیری نمی‌باشد [5].

صفدریان و همکاران [6، 7] در یک مطالعه به بررسی تجربی و عددی تأثیر نسبت ضخامت و استحکام ورق‌های تشکیل دهنده ورق ترکیبی اتصال داده شده به هم، بر روی

[1] Tailor Welded Blanks (TWBs)
[2] Incremental Sheet Forming (ISF)
[3] Single Point Incremental Forming (SPIF)
[4] Backing Plate
[5] Blank Holder

شکل‌پذیری و منحنی حد شکل‌دهی ورق‌های ترکیبی در فرایندهای غیر تدریجی، پرداختند و نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که هر چه ورق‌های تشکیل دهنده ورق ترکیبی، دارای اختلاف ضخامت و اختلاف استحکام کمتری باشند، میزان شکل‌پذیری ورق ترکیبی افزایش یافته و منحنی حد شکل‌دهی بالاتر خواهد رفت. و در پایان نتایج تحلیلی را با نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی مقایسه کردند که نزدیکی خوبی داشتند. سیلوا و همکاران [3]، SPIF ورق‌های ترکیبی جوش‌دوخت شده با جوش اصطکاکی[1] از جنس آلومینیم را مورد مطالعه قرار دادند. در این پژوهش شکل‌پذیری قطعات به فرم هرم و مخروط ناقص با زاویه دیواره متغیر از ورق ترکیبی مورد بررسی قرار گرفت. جسویت و همکاران [8] در یک مطالعه نشادن دادند که با کاهش قطر ابزار در فرایند SPIF شکل‌پذیری افزایش پیدا می‌کند. دافلو و همکاران [9] با افزایش تعداد مراحل SPIF ورق تک لایه به این نتیجه رسیدند که رسیدن به زاویه دیواره 90 درجه غیر ممکن نیست. سی‌یو- باتاریو و همکاران [10] در یک مطالعه بررسی کردند که کیفیت و موقعیت خط جوش بیشترین تأثیر را روی شکل‌پذیری ورق‌های ترکیبی در تست مکانیکی کشش داشته است.

آمبروگیو و همکاران [11] با ارائه یک استراتژی بر اساس SPIF معکوس و دو مرحله‌ای و با استفاده از آنالیز آماری در خصوص تأثیر پارامترهای فرایند بر روی دقت ابعادی، تحقیقاتی را انجام دادند. در این روش در مرحله اولSPIF به روش معمولی انجام شده و سپس در مرحله دوم، قطعه شکل داده شده به صورت معکوس بسته شده و مجدداً قطعه با مسیر جدید ازسمت پشت شکل داده می‌شود که این کار باعث بالا بردن دقت ابعادی در قطعات فلزی می‌شود. راتناچان و همکاران [12] تحقیقی برروی شکل‌پذیری ورق‌های ترکیبی از دو جنس St37 و SUS304 جوش‌دوخت شده توسط لیزر CO2 در فرایند SPIF انجام دادند. هدف از این تحقیق، بررسی شکل‌پذیری ورق ترکیبیSt37 وSUS304 در ناحیه جوش برای شکل‌دهی یک نیم‌کره بود. میرنیا و همکاران [13] در یک تحقیق به بررسی SPIF چند مرحله‌ای به منظور کنترل نازک شدگی یک مخروط ناقص با زاویه دیواره ▫70 از جنس آلومینیم پرداختند و به این نتیجه رسیدند که با ارائه یک استراتژی تغییر شکل دو مرحله‌ای و بدست آوردن پارامترهای تعریف کننده آن بر اساس یک الگوریتم مناسب می‌توان نازک شدگی و زمان انجام فرایند را بهبود بخشید.

در فرایند SPIF، جریان مواد توسط حرکت ابزار ماشین CNC کنترل می‌شود. رفتار ورق‌های ترکیبی در SPIF نسبت به آنچه که در سایر فرایندها اتفاق می‌افتد، کاملاً فرق دارد و تکنیک‌های متداول پیش‌بینی شکل‌پذیری همچون FLD بر پایه گلویی شدن، برای پیش بینی شکست در فرایندSPIF، معتبر نمی‌باشند. از آنجا که شکل‌پذیری ورق‌های جوش‌دوخت شده فولادی درSPIF کمتر مورد توجه قرار گرفته است و همچنین با توجه به کاربرد گسترده این ورق‌ها در صنایع مختلف از جمله خودروسازی، هدف از این تحقیق، تعیین بیشترین عمق قابل شکل‌دهی ورق‌های ترکیبی تهیه شده از ورق پایه St12 و St14 با ضخامت‌های 1 و 1/5 میلی‌متر در فرایند SPIF قطعاتی به فرم هرم ناقص به روش تجربی می‌باشد. در این راستا ابتدا شکل‌پذیری ورق‌های پایه در فرایند SPIF ارزیابی می‌گردد. سپس، تأثیر چیدمان‌های مختلف جنس و ضخامت و نیز تأثیر راستای خط جوش نسبت به جهت نورد ورق‌های پایه بر روی شکل‌پذیری ورق‌های جوش‌دوخت شده مورد بررسی قرار می‌گیرد.

2- مراحل تجربی

2-1-تهیه ورق‌های پایه و ورق‌های جوش‌دوخت شده توسط لیزر

ورق پایه مورد استفاده در آزمایش‌ها از جنس فولاد St12 و St14 با ضخامت‌های 1 و 1/5 میلی‌متر شرکت فولاد مبارکه می‌باشد. با استفاده از این دو جنس و دو ضخامت، حداکثر می‌توان 10 ترکیب مختلف مطابق جدول 1 برای تهیه ورق‌های جوش‌دوخت شده در نظر گرفت.

جدول 1 چیدمان مختلف ورق ترکیبی از دو جنسSt12 وSt14 و دو ضخامت 1 و 1/5 میلی‌متری

Table 1 Different welded sheet layout of St12 and St14 and two Thicknesses of 1 mm and 1.5 mm

ردیف	چیدمان	ترکیب
1	St12-St12	St12/1-St12/1
2		St12/1.5-St12/1.5
3		St12/1-St12/1.5
4	St14-St14	St14/1-St14/1
5		St14/1.5-St14/1.5
6		St14/1-St14/1.5
7	St12-St14	St12/1-St14/1
8		St12/1.5-St14/1.5
9		St12/1-St14/1.5
10		St12/1.5-St14/1

[1] Friction Stir Welding (FSW)

برای هر ترکیب از 10 مورد ذکر شده، تعداد بیشماری راستای خط جوش نسبت به جهت نورد[1] می‌توان در نظر گرفت. با این وجود، عموماً راستاهای نشان داده شده در شکل 3 از سوی محققان مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در این مقاله، به‌منظور جمع‌بندی دقیق‌تر نتایج، موارد 1 و 3 در نظر گرفته شده‌اند. برای هر راستای خط جوش 10 قطعه و در مجموع 20 نمونه از ورق‌های جوش‌دوخت شده تهیه شد.

در این پژوهش، برای دوخت دو ورق جهت تهیه ورق ترکیبی، از دستگاه جوش لیزر CNC شرکت پرتو پردازش وابسته به سازمان انرژی اتمی استفاده گردیده که در شکل 4 نشان داده شده است. پس از بستن قطعات در فیکسچر، عملیات جوش‌کاری بدون دخالت اپراتور و به‌صورت اتوماتیک انجام می‌گردید. فرایند جوش‌کاری لیزر دارای پارامترهای مختلفی است که تأثیر بسزایی بر کیفیت جوش دارند. صفدریان و همکاران [14، 15] تحقیقی در خصوص تأثیر پارامترهای جوش لیزر با بهره گیری از روش طراحی آزمایشات تاکوچی بر روی رفتار شکل‌دهی و جابجایی خط جوش در ورق‌های ترکیبی در فرایندهای غیر تدریجی انجام دادند. با توجه به نتایج حاصل از این پژوهش، کاهش مقدار انرژی ورودی و افزایش نرخ خنک کاری، افزایش عمق شکل‌دهی را به همراه خواهد اشت، در حالی‌که افزایش سرعت جوش‌کاری و زمان پالس باعث بیشتر شدن عمق شکل‌دهی و بالاتر رفتن سطح منحنی حد شکل‌دهی خواهد شد. در پژوهش حاضر، پارامترهای مناسب برای جوش‌کاری ورق‌ها به صورت سعی و خطا و با تولید تعداد زیادی ورق ترکیبی به دست آمده‌اند که در جدول 2 آورده شده است. یادآور می‌گردد که برای جوش دو ورق با ضخامت مختلف، آزمایش‌های انجام شده نشان داده‌اند که پارامترهای ورق ضخیم‌تر مناسب نبوده و موجب ذوب شدن ناحیه جوش می‌گردد. از این رو، از پارامترهای ورق نازک‌تر استفاده شده است. با استفاده از پارامترهای به‌دست آمده، شرایط یکسان برای جوش‌کاری تمام قطعات ایجاد گردید. تمام قطعات بعد از جوش‌کاری، با میکروسکوپ نوری کنترل کیفیت شد و بر روی بعضی از قطعات هم به صورت تصادفی تست رادیوگرافی انجام گردید تا اطمینان حاصل شود که نمونه‌های تهیه شده برای فرایند شکل‌دهی بدون عیب بوده‌اند. دو نمونه از ورق جوش‌دوخت شده به کمک لیزر و همچنین یک نمونه از عکس رادیوگرافی به ترتیب در شکل‌های 5 و 6 نشان داده شده است.

[1] Rolling Direction (RD)

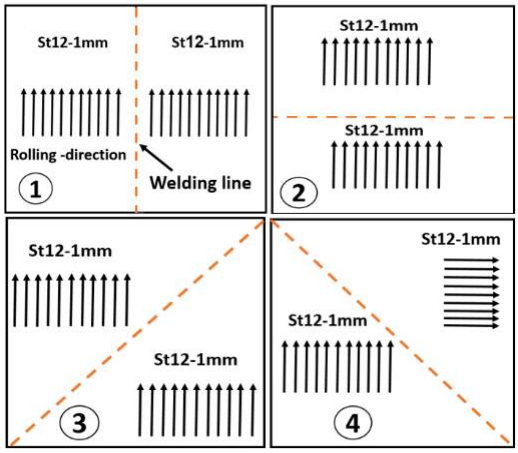

Fig. 3 The samples of the proposed weld line compared to the rolling direction for combination No. 1

شکل 3 نمونه راستای خط جوش پیشنهاد شده نسبت به جهت نورد برای ترکیب شماره 1

جدول 2 پارامترهای مختلف جوش لیزر در تولید ورق ترکیبی

Table 2 Various parameters of laser welding in welded sheet production

ردیف	ضخامت (mm)	جریان (Am)	پهنای پالس (ms)	فرکانس (Hz)	پیشروی (mm/s)
1	1 -1	130	6	18	5 /6
2	1 -1/5	130	6	18	5 /6
3	1/5 -1/5	140	9	10	3 /1

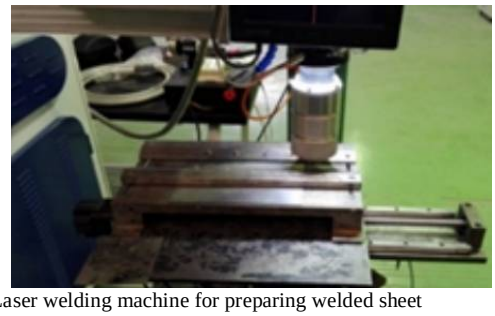

Fig. 4 Laser welding machine for preparing welded sheet

شکل 4 دستگاه جوش لیزر جهت تهیه ورق ترکیبی

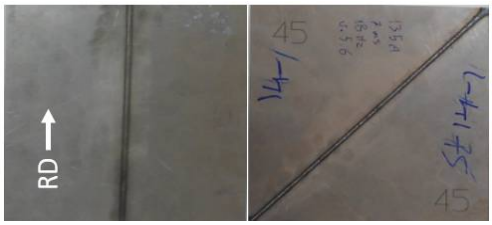

Fig. 5 The samples prepared in two directions of welding line line

شکل 5 نمونه‌های ورق ترکیبی تهیه شده در دو راستای خط جوش

2- 2- آزمون تجربی SPIF ورق‌های ترکیبی

آزمون تجربی شامل SPIF ورق‌های پایه و ترکیبی برای شکل‌دهی قطعات هرم ناقص با زوایای دیواره ثابت برای مقادیر مختلف می‌باشد.

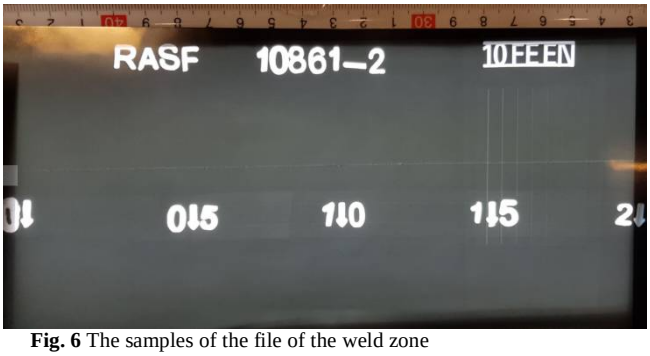

Fig. 6 The samples of the file of the weld zone

شکل 6 نمونه عکس رادیوگرافی از منطقه جوش

بدین منظور یک هرم ناقص با اندازه قائده بزرگ 100×100 میلی‌متر و اندازه قائده کوچک 16×16 میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود که زاویه دیواره آن متناسب با ارتفاع هرم تغییر می‌کند. برای انجام فرایند SPIF ورق تک لایه، ابتدا ورق‌های اولیه با ابعاد 210×210 میلی‌متر که متناسب با ابعاد فیکسچر است، برش‌کاری می‌شود، سپس بر روی فیکسچر نگهدارنده ورق قرار داده می‌شوند. برای قرارگیری بهتر ورق، یک صفحه پشتیبان با ابعاد 210×210 میلی‌متر و ضخامت 8 میلی‌متر که حفره مربعی شکل به ابعاد تقریبی قاعده هرم در وسط آن ایجاد شده، در زیر آن و همچنین یک ورق‌گیر در بالای ورق قرار می‌گیرد و در نهایت ورق به کمک ورق‌گیر توسط چند عدد پیچ و روبند محکم می‌شود. ابزار مورد استفاده دراین پژوهش، یک ابزار سر کروی از جنس کاربید تنگستن می‌باشد. فیکسچر، ابزار و مجموعه مورد نیاز برای آزمون تجربی SPIF این پژوهش در شکل 7 آورده شده است. مسیر حرکت ابزار یا همان مختصات فضایی سر قلم برای SPIF هرم ناقص در شکل 8 نشان داده شده است که با استفاده از نرم‌افزار Powermill بصورت مارپیچ با گام عمودی 0/5 میلی‌متر تهیه شده است. در تمام مراحل اجرای این پژوهش نرخ پیشروی ابزار 1200 میلی‌متر در دقیقه و سرعت دوران اسپیندل 300rpm بوده است و همچنین برای کاهش اصطکاک بین ابزار و ورق از روغن هیدرولیک SE60 شرکت نفت بهران استفاده شده است.

3- نتایج و بحث

برای بررسی SPIF ورق تک لایه، تعدادی قطعه با فرم هرم ناقص با ابعاد قائده یکسان و با زاویه دیواره ثابت (α) از 60 تا 71 درجه شکل داده شد و برای هر زاویه 4 بار تکرار انجام گردید. نمونه‌هایی از این قطعات تولید شده هرم ناقص در SPIF ورق تک لایه St12 با ضخامت 1/5 میلی‌متر در شکل 9 نشان داده شده است.

Fig. 7 Fixture, tools and setup required for the SPIF process

شکل 7 فیکسچر، ابزار و مجموعه مورد نیاز برای فرایندSPIF

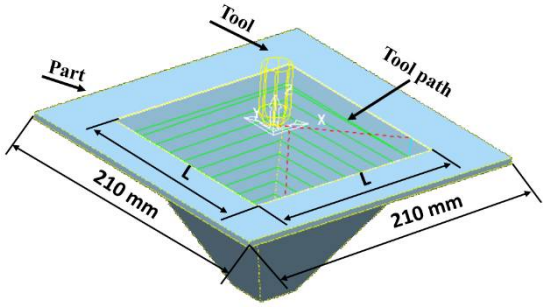

Fig. 8 The tool path in the truncated pyramid SPIF process

شکل 8 مسیر حرکت ابزار در فرایند SPIF هرم ناقص

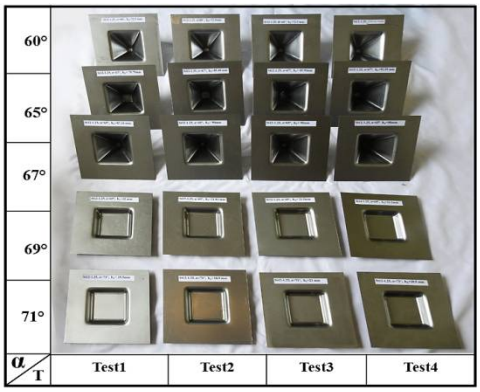

Fig. 9 Truncated pyramid Parts produced in SPIF of one layer sheet St12-1.5mm at fixed wall angles

شکل 9 قطعات تولید شده هرم ناقص در SPIF ورق تک لایه St12/1.5mm در زاویه دیواره ثابت

همچنین وضعیت و حداکثر عمقی که در هر زاویه دیواره ثابت، پارگی اتفاق افتاده، برای ورق St12 با ضخامت 1/5 میلی‌متر در جدول 3 آورده شده است. با بررسی به عمل آمده مشاهده شد که با افزایش تدریجی زاویه دیواره تا زاویه 67 و 68 درجه به ترتیب برای St12 وSt14 با ضخامت 1/5 میلی‌متر شکل‌دهی بطور کامل انجام می‌شود، ولی از آن به بعد با افزایش زاویه دیواره، عمق پارگی کمتر از مقدار طراحی شده هرم ناقص خواهد بود.

جدول 3 مقادیر عمق پارگی برحسب زاویه دیواره ثابت، ورق St12/1.5 mm

Table 3 The fracture depth values in terms of the fixed wall angle for the St12 / 1.5 mm

ردیف	زاویه دیواره (درجه)	وضعیت شکل‌دهی	عمق شکل‌دهی (میلی‌متر)
1	60	کامل	72/75
2	65	کامل	90/07
3	67	کامل	98/95
4	68	پارگی اتفاق افتاد	22/75
5	69	پارگی اتفاق افتاد	21/63
6	71	پارگی اتفاق افتاد	19/58

همچنین مشاهده شد که با افزایش تدریجی زاویه دیواره تا زاویه 66 و 66/5 درجه به ترتیب برای St12 و St14 با ضخامت 1 میلی‌متر شکل‌دهی بطور کامل انجام می‌شود، ولی از آن به بعد با افزایش زاویه دیواره، عمق پارگی کمتر از مقدار طراحی شده هرم ناقص خواهد بود.

برای بررسی شکل‌پذیری تدریجی ورق ترکیبی، تعداد 20 قطعه از ورق‌های ترکیبی تهیه شده در دو راستای خط جوش در راستای نورد و خط جوش در راستای 45 درجه نسبت به نورد، به فرم هرم ناقص شکل داده شد. برای جلوگیری از هزینه بالا، شکل‌دهی این قطعات در محدوده زاویه دیواره بحرانی متوسط بدست آمده برای ورق‌های پایه یعنی 67 درجه انجام شده است. ورق‌های پایه از هر دو جنس و ضخامت، تا حداکثر عمق در نظر گرفته شده در هرم ناقص با زاویه دیواره ذکر شده در آزمون تجربی SPIF یعنی 98/95 میلی‌متر، بطور کامل شکل گرفته‌اند، که یک مورد از نتایج آن در جدول 3 آورده شده است.

نمونه‌هایی از قطعات شکل داده شده ورق‌های ترکیبی در دو راستای خط جوش در فرایند SPIF در شکل10 نشان داده شده است. در تمام مراحل پژوهش، شکل‌دهی تا لحظه‌ای که ورق دچار پارگی شود ادامه پیدا می‌کند و عمق مربوط به آن ثبت می‌گردد. کیفیت جوش تأثیر بسزایی در مقدار عمق شکل‌دهی ورق‌های ترکیبی دارد و در صورت بالا بودن کیفیت جوش، محل پارگی عمود بر خط جوش و در غیر این صورت محل پارگی جوش به موازات خط جوش خواهد بود. نمونه‌ای از محل پارگی خط جوش ورق ترکیبیSt12/1-St14/1.5 با خط جوش در راستای نورد که مربوط به آزمایش شماره 9 جدول 2 می‌باشد، در شکل 11 نشان داده شده است که در آن پارگی، عمود بر خط جوش و بعد از پاره شدن گوشه‌های قطعه اتفاق افتاده است، که نشان دهنده بالا بودن کیفیت جوش می‌باشد. عمق پارگی برای 10 ترکیب مختلف ورق ترکیبی مورد بررسی در این پژوهش در زاویه دیواره 67 درجه برای حالتی که خط جوش در راستای نورد باشد، به صورت یک نمودار ستونی در شکل 12 آورده شده است.

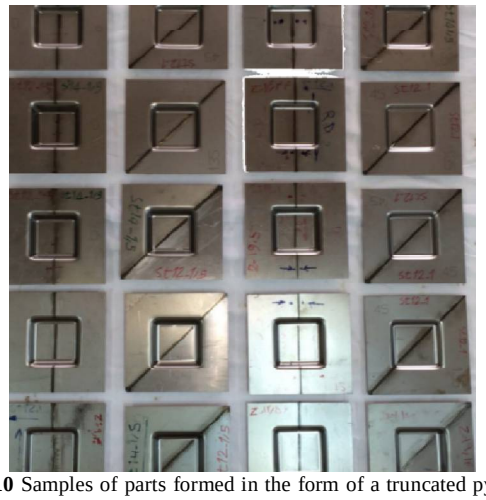

Fig. 10 Samples of parts formed in the form of a truncated pyramid in SPIF at two sides of the weld line.

شکل 10 نمونه‌های از قطعات شکل داده شده ورق‌های ترکیبی به فرم هرم ناقص در فرایند SPIF در دو راستای خط جوش

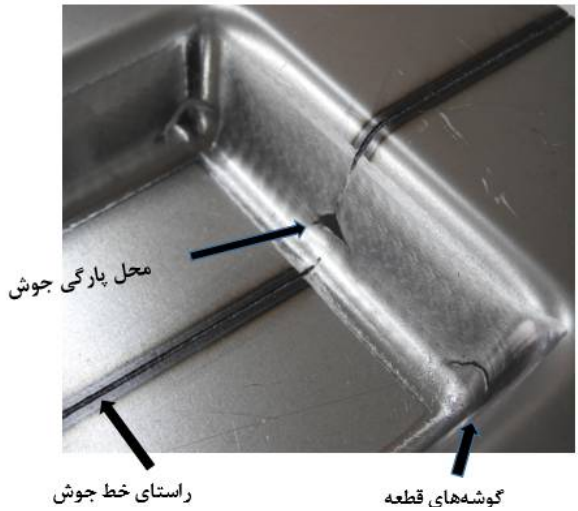

Fig. 11 The location of the fracture of the sheet St12/1-St14/1.5 in the SPIF of a truncated pyramid

شکل 11 محل پارگی خط جوش ورق ترکیبی St12/1-St14/1.5 با خط جوش در راستای نورد در SPIF هرم ناقص

همان طور که در نمودار مشخص است، برای ورق‌های جوش‌دوخت شده هم جنس از St12، ورق ترکیبی-St12/1 St12/1 دارای عمق 15/35 میلی‌متر، ورق ترکیبی -St12/1.5 St12/1.5 دارای بیشترین عمق شکل‌دهی، و عمق شکل‌دهی ورق ترکیبی St12/1-St12/1.5 کمتر از دو ترکیب قبلی است. در مورد ورق St14 نیز چنین نتیجه‌ای قابل بیان است؛ با این تفاوت که عمق پارگی در ترکیب‌های مشابه اندکی بیشتر است.

بنابراین، برای ورق‌های جوش‌دوخت شده از دو ورق با جنس یکسان ولی ضخامت‌های متغیر، عمق ورق‌های هم‌ضخامت بیشتر است که با نتایج گرفته شده توسط دیگر محققان [6، 7] در شکل‌پذیری ورق‌های جوش‌دوخت شده به روش‌های سنتی و غیر تدریجی کاملاً مطابقت دارد. همچنین، در ورق‌های جوش‌دوخت شده غیرهمجنس از St12 و St14، ترکیب St12/1-St14/1 دارای کمترین و ترکیب St12/1.5-St14/1.5 دارای بیشترین عمق می‌باشد. بعلاوه، عمق پارگی برای 10 حالت مختلف ورق جوش‌دوخت شده مورد بررسی برای حالتی که خط جوش با راستای نورد زاویه 45 درجه ساخته است، به صورت یک نمودار ستونی در شکل 13 آورده شده است.

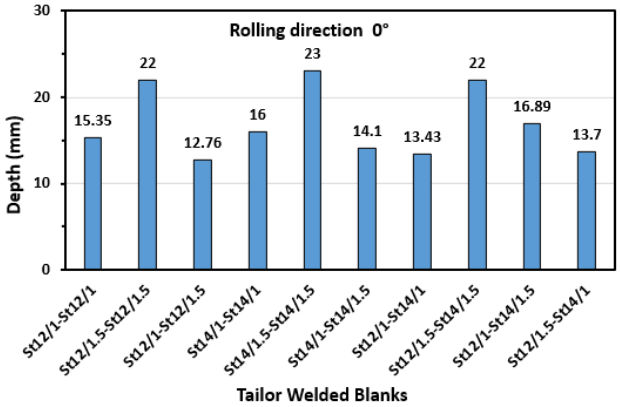

Fig. 12 the fracture depth column diagram for various TWBs in SPIF, Welding line in rolling direction

شکل 12 نمودار ستونی عمق پارگی ترکیب مختلف TWBs در فرایند SPIF، خط جوش در راستای نورد

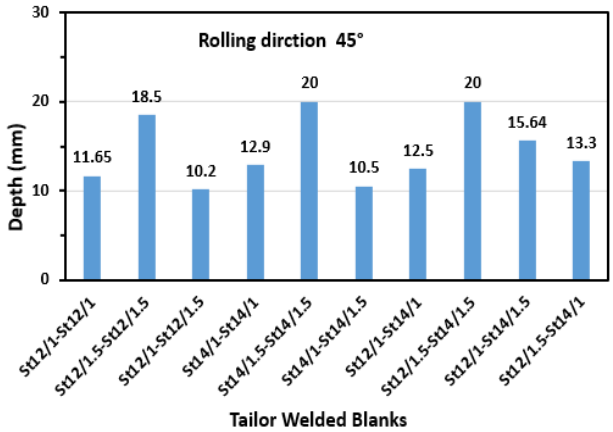

Fig. 13 the fracture depth column diagram for various TWBs in SPIF, Welding line along 45 degree

شکل 13 نمودار ستونی عمق پارگی ترکیب مختلف TWBs درفرایند SPIF، خط جوش در راستای 45 درجه

همان طور که در نمودار مشخص است، برای ورق‌های جوش‌دوخت شده هم جنس از St12، ورق ترکیبی St12/1- St12/1 دارای عمق 11/65 میلی‌متر است، که در مقایسه با حالتی که خط جوش در راستای نورد است، تقریباً 24 درصد کمتر است. این در حالی است که ورق ترکیبی St12/1.5-St12/1.5 دارای بیشترین عمق شکل‌دهی بوده و در مقایسه با حالتی که خط جوش در راستای نورد است، حدود 16 درصد کمتر است. این موضوع برای ورق‌های جوش‌دوخت شده هم جنس St14 به این صورت است که ترکیب St14/1-St14/1 دارای عمق 12/90 میلی‌متر است که در مقایسه با حالتی که خط جوش در راستای نورد است حدود 19 درصد کمتر است. علاوه بر آن، ترکیب St14/1-St14/1.5 دارای کمترین عمق می‌باشد که علت این امر، تفاوت در ضخامت دو ورق پایه می‌باشد. با مقایسه دو نمودار در شکل‌های 12 و 13 می‌توان گفت که عمق پارگی در حالت خط جوش در جهت نورد در تمام ترکیب‌های جدول 1 نسبت به حالت خط جوش 45 درجه بین 3 تا 25 درصد بیشتر می‌باشد.

در هر دو زاویه راستای خط جوش، برای ورق‌های جوش‌دوخت شده از St12 و St14 با ضخامت‌های غیر یکسان، عمق شکل‌دهی ورق‌های ترکیبی با ورق ضخیم‌تر St14، بیشتر است. در واقع، در این حالت هم استحکام و هم سطح مقطع ورق پایه بیشتر شده است که باعث بیشتر شدن عمق شکست ورق ترکیبی خواهد شد.

به منظور تعیین میزان اثرگذاری پارامترهای ضخامت، زاویه راستای خط جوش و جنس ورق پایه، اثرات میانگین سطوح پارامتری بر میزان عمق شکل‌دهی ورق در لحظه پارگی محاسبه گردید. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که ضخامت، زاویه راستای خط جوش و جنس ورق به طور میانگین به ترتیب موجب تغییر عمق ورق به میزان 2/49، 2/17 و 0/32 میلی‌متر می‌شود. بنابراین، اثرگذارترین پارامتر ورودی ضخامت ورق و کم اثرترین پارامتر، جنس ورق شناخته شد. اثر میانگین تغییر سطوح پارامترها در شکل 14 نشان داده شده است. مطابق شکل، تغییر زاویه خط جوش از 0 به 45 درجه موجب کاهش عمق پارگی ورق می‌شود. در این حالت، ناحیه جوش در گوشه قطعه‌کار قرار می‌گیرد. به دلیل پایین بودن شکل‌پذیری ناحیه جوش و از طرفی وجود تنش‌های دو محوره در گوشه قطعه‌کار که تغییر شکل بیشتری در ورق ایجاد می‌کند، ورق در عمق‌های کمتری دچار پارگی می‌شود. همچنین، تغییر ضخامت ورق از 1 به 1/5 میلی‌متر افزایش عمق پارگی ورق را در پی دارد. در نهایت، تغییر جنس ورق از St12 به St14 تأثیر کمی روی افزایش عمق پارگی ورق دارد که به ماهیت جنس ورق مربوط است.

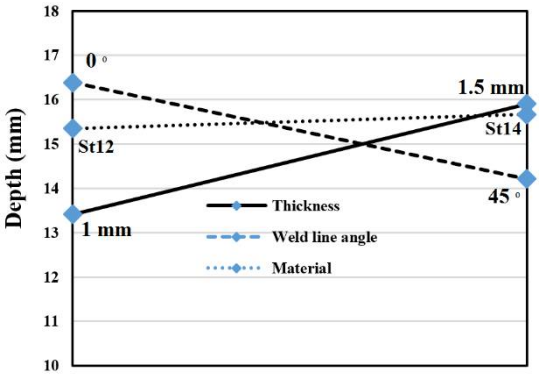

Fig. 14 The average effect of thickness, weld line angle and material on the fracture depth of sheet.

شکل 14 اثر میانگین پارامترهای ضخامت، زاویه خط جوش و جنس بر روی عمق شکست ورق

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش شکل‌پذیری ورق‌های جوش‌دوخت شده توسط لیزر از جنس St12 وSt14 به ضخامت‌های 1 و 1/5 میلی‌متر در فرایند SPIF قطعاتی به فرم هرم ناقص، به روش تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش ابتدا شکل‌پذیری ورق‌های پایه تک لایه St12 و St14 با ضخامت‌های 1 و 1/5 میلی‌متر در زوایه دیواره مختلف به صورت جداگانه بررسی شد و مشخص شد که زاویه حد شکل‌دهی برای ورق پایه St12 با ضخامت 1 و 1/5 میلی‌متر به ترتیب در حدود 66/5 و 67 درجه و برای ورق پایه St14 با ضخامت ضخامت 1 و 1/5 میلی‌متر، به ترتیب در 67 و 68 درجه است. برای بررسی شکل‌پذیری ورق‌های جوش‌دوخت شده به کمک لیزر در فرایند SPIF، نمونه‌هایی از هرم ناقص از ورق ترکیبی با ترکیبات مختلف جنس، ضخامت‌های ذکر شده و راستای مختلف خط جوش در محدوده زاویه دیواره بحرانی متوسط بدست آمده برای ورق‌های پایه یعنی 67 درجه شکل‌دهی شد و مشخص گردید که عمق شکل‌دهی ورق ترکیبی به شدت کاهش می‌یابد و دلیل آن، این است که زاویه حد شکل‌دهی ورق ترکیبی کمتر از ورق‌های پایه بوده و باید در زاویه حد شکل‌دهی مخصوص خودش شکل‌دهی شوند، در غیر این صورت عمق شکست خیلی کمتر خواهد شد.

نتایج بدست آمده از این تحقیق نشان داد که:

- پارامترهای ضخامت، زاویه راستای خط جوش و جنس ورق به طور میانگین به ترتیب موجب تغییر عمق ورق به میزان 2/49، 2/17 و 0/32 میلی‌متر می‌شود. بنابراین، اثرگذارترین پارامتر ورودی ضخامت ورق و کم اثرترین پارامتر، جنس ورق شناخته شد.
- زاویه حد شکل‌دهی برای ورق‌های تک‌لایه و ورق‌های جوش‌دوخت شده یکسان نبوده و ورق‌های جوش‌دوخت شده، زاویه حد شکل‌دهی خیلی کمتری نسبت به ورق‌های پایه دارند.
- برای ورق‌های جوش‌دوخت شده از دو ورق با جنس یکسان ولی ضخامت‌های متغیر 1 و 1/5 میلی‌متر، عمق ورق‌های هم‌ضخامت بیشتر است.
- در هر دو زاویه راستای خط جوش 0 و 45 درجه نسبت به راستای نورد، برای ورق‌های جوش‌دوخت شده از St12 و St14 با ضخامت‌های غیر یکسان، عمق شکل‌دهی ورق‌های ترکیبی با ورق ضخیم‌تر از St14، بیشتر است. در واقع، در این حالت شکل‌پذیری و سطح مقطع ورق پایه بیشتر شده است که باعث افزایش عمق شکست ورق ترکیبی خواهد شد.
- راستای خط جوش در عمق شکل‌دهی ورق‌های ترکیبی مورد مطالعه، تأثیر داشته و به طور متوسط عمق پارگی ورق در حالت خط جوش 45 درجه، نسبت به حالت خط جوش در راستای نورد 14 درصد کمتر است، بنابراین استفاده از راستای خط جوش به موازات جهت نورد در صنعت پیشنهاد می‌شود.

5- مراجع

[1] S.Matsubara, Incremental backward bulge forming of a sheet metal with a hemispherical head tool-a study of a numerical control forming system II, *Journal of the Japan society for technology of plasticity*, Vol. 35, No. 406, pp. 1311-1316, 1994.

[2] G.Vijay,V.Manohar, R and R. Kumar, Analytical prediction of springback in bending of tailor-welded blanks incorporating effect of anisotropy and weld zone properties, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, Vol. 232, No. 4, pp. 294-306-114, 2018.

[3] M.B. Silva, M. Skjoedt, Single point incremental forming of tailored blanks produced by friction stir welding, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 2, pp. 811-820, 2009.

[4] T.J. Kim, D.Y. Yang, Improvement of formability for the incremental sheet metal forming process, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 42, No. 7, pp. 1271-1286, 2000.

[5] K. Jackson, J. Allwood, The mechanics of incremental sheet forming, *Journal of materials processing technology*, Vol. 209, No. 3, pp. 1158-1174, 2009.

[6] R.Safdarian, H. Moslemi. Naeini, M.J. Torkamany, G.H. Liaghat, Experimental and theoretical investigation of thickness ratio effect on the formability of tailor welded blank, *Optics & Laser Technology*, 51 (0), pp. 24-31, 2013.

[7] R.Safdarian, The Effects of Strength Ratio on the

Forming Limit Diagram of Tailor Welded Blanks, *Ironmaking and Steelmaking: Processes, Products and Applications*, pp. 2-17, 2016.

[8] J. Jeswiet, G. Micari, Asymmetric single point incremental forming of sheet metal, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 2, No. 54, pp. 88-114, 2005.

[9] J.R. Dufiou, J. Verbert, Process window enhancement for single point incremental forming through multi-step toolpaths, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 57, No. 1, pp. 253-256, 2008.

[10] V. Ciubotariu, G. Brabie, Weld line behaviour during uniaxial tensile testing of tailor welded blanks, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Vol. 11, No. 4, pp. 811-824, 2011.

[11] G. Ambrogio, L. Filice, On the use of Back-drawing Incremental Forming (BIF) to improve geometrical accuracy in sheet metal parts, *International journal of material forming*, Vol. 5, No. 4, pp. 269-274, 2012.

[12] K. Rattanachan, K. Sirivedin, Formability of Tailored Welded Blanks in Single Point Incremental Forming Process, *Advanced Materials Research. Trans Tech Publ*, Vol. 979, pp. 339-342, 2014.

[13] M.J. Mirnia, B.M. Dariani, An investigation on multistage incremental forming to control thinning in a truncated cone of an aluminum alloy sheet, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 14, pp. 262-270, 2015. (In Persian)

[14] R. Safdarian, H. Moslemi.Naeini, J. Sabaghzade, M.J.Torkamany, Effect of Laser Welding Parameters on Forming Behavior of Tailor Welded Blanks, *Journal of Advanced Materials Research (AMR)*, Vol. 445, pp. 406-411, 2012.

[15] R. Safdarian, H. Moslemi.Naeini, G.H. Liaghat and M.M. Kasaei, Investigation of Weld Line Movement in Tailor Welded Blank Forming, *Journal of Advanced Materials Research (AMR)*, Vol. 445, pp 39-44, 2012.