



## بررسی تجربی شکل پذیری ورق های فولادی جوش دوخت شده به کمک لیزر در فرایند شکل دهی تدریجی تک نقطه ای

روح اله پناهی لیاولی<sup>1</sup>، محمد بخشی جوئیباری<sup>2\*</sup>، حمید گرجی<sup>3</sup>، محمد جواد میر نیا<sup>4</sup>

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

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

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

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

\* بابل، صندوق پستی 4849، [bakhshi@nit.ac.ir](mailto:bakhshi@nit.ac.ir)

### چکیده

### اطلاعات مقاله

ورق های جوش دوخت شده از اتصال لب به لب ورق های پایه به روش های مختلف جوش کاری تولید می شوند. این ورق ها تحت عنوان ورق های ترکیبی یا جوش دوخت شده وجود داشته و به دلیل مزایای متعدد، کاربردهای فراوانی در بخش های مختلف صنعت پیدا کرده اند. در این پژوهش، شکل پذیری و تأثیر راستای خط جوش ورق های جوش دوخت شده توسط لیزر از جنس های St12 و St14 به ضخامت های 1 و 1/5 میلی متر در فرایند شکل دهی تدریجی تک نقطه ای قطعاتی به فرم هرم ناقص، مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا بیشترین عمق قابل شکل دهی در شکل دهی تدریجی تک نقطه ای یک هرم ناقص از هر کدام از ورق های پایه به ازای مقادیر مختلف زاویه دیواره به دست آمد و زاویه دیواره بحرانی برای هر کدام از آن ها تعیین شد. سپس، شکل دهی تدریجی هرم ناقص با استفاده از ورق های جوش دوخت شده در محدوده زاویه دیواره بحرانی ورق های پایه انجام گردید. در این راستا، ورق های ترکیبی با چیدمان و ترکیب های مختلف از ورق های پایه در نظر گرفته شد. جهت بررسی تأثیر راستای خط جوش در عمق شکل دهی، هر ترکیب با دو راستای خط جوش 0 و 45 درجه نسبت به جهت نورد تهیه گردید. نتایج آزمایش نشان داد که عمق پارگی ورق های جوش دوخت شده در راستای 45 درجه، نسبت به ورق های با خط جوش در راستای نورد بطور میانگین 14 درصد کاهش یافت. همچنین، میانگین عمق شکل دهی ورق های جوش دوخت شده در زاویه متوسط حد بحرانی دیواره ورق های پایه به حدود 25 درصد ورق های پایه کاهش می یابد. بنابراین، ورق های ترکیبی باید در زاویه دیواره حد بحرانی خودشان شکل دهی شوند.

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 2 دی 1397  
پذیرش: 25 اسفند 1397  
ارائه در سایت: آبان 1398

کلیدواژه ها:  
شکل پذیری  
شکل دهی تدریجی تک نقطه ای  
ورق های ترکیبی

## 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](mailto: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° relative to the rolling direction. The experiment results showed that the fracture depth of TWBs with 45° 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.

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)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

## 1- مقدمه

امروزه به کارگیری سیستم های کنترل عددی کامپیوتری در شکل دهی ورق پایه و ترکیبی<sup>1</sup> و همچنین استفاده از ورق های 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 می باشد. شکل دهی تدریجی ورق<sup>2</sup>، نمونه بارز این روش ها می باشد. این فرایند اولین بار به عنوان تکنولوژی شکل دهی بدون قالب توسط ماتسوبا[1] در اوایل سال 1990 در کشور ژاپن معرفی شد. امروزه این روش برای تعداد کم و تنوع محصولات بالا، در صنعت پیشنهاد می شود. ورق های ترکیبی متشکل از دو یا چند ورق با ضخامت، خواص و حتی پوشش متفاوت می باشند که به صورت لب به لب به هم متصل شده و سپس به وسیله یکی از فرایندهای شکل دهی به فرم نهایی قطعه تبدیل می گردند. پژوهش های انجام شده در گذشته در زمینه ISF، بیشتر بر روی ورق های تک لایه صورت گرفته است، ولی امروزه تقاضا برای استفاده از ورق های جوش دوخت شده، خصوصاً در صنعت خودرو و هوا فضا روز به روز در حال افزایش است. نمونه ای از کاربرد ورق ترکیبی در تولید بدنه خودرو در شکل 1 نشان داده شده است که در آن ورق های با ضخامت های مختلف به هم جوش شده اند. قسمت هایی از درب خودرو که نیاز به استحکام بیشتری دارد، دارای ضخامت بیشتر و آن قسمت هایی که نیاز به تحمل بار زیادی ندارد، دارای ضخامت کمتر می باشد. متفاوت بودن خواص مکانیکی و ضخامت هر یک از ورق ها و همچنین روش اتصال آن ها به یکدیگر، سبب بروز مشکلاتی در شکل دهی این گونه ورق ها شده است.

فرایند ISF با توجه به نحوه تماس ورق با ابزار به دو روش تک نقطه ای و دو نقطه ای تقسیم می شود که در این بررسی شکل دهی تدریجی تک نقطه ای<sup>3</sup> هرم ناقص از ورق های پایه و جوش دوخت شده توسط لیزر مورد توجه قرار گرفته است. شکل 2 شماتیک SPIF ورق فلزی با زاویه دیواره ثابت  $\psi$  را نشان می دهد [3]. تجهیزات مورد نیاز در این فرایند شامل یک ابزار ساده سر کرومی، فیکسچر مخصوص نگهداری ورق و یک فرز CNC سه محوره می باشد. در این فرایند ابتدا ورق با استفاده از یک فیکسچر مخصوص مهار می شود و سپس با حرکت یک ابزار استوانه ای سر کرومی بسته شده بر روی یک فرز کنترل عددی در یک مسیر برنامه ریزی شده، به تدریج به شکل مورد نظر در می آید [4].

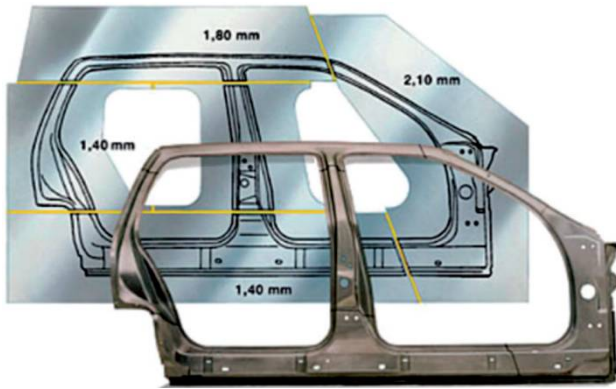


Fig. 1 Example of the use of TWBs in car door production [2]  
شکل 1 نمونه ای از کاربرد ورق ترکیبی در تولید درب خودرو [2]

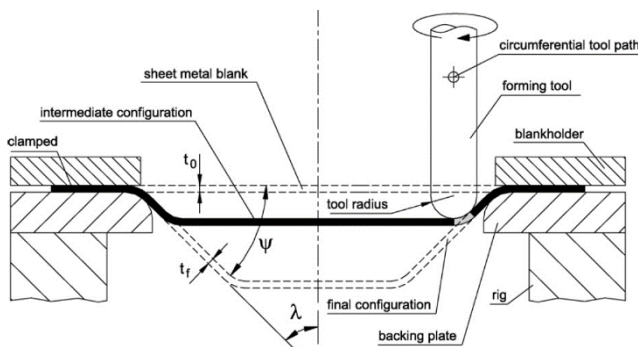


Fig. 2 The overall schematic of SPIF [3]  
شکل 2 شماتیک شکل دهی تدریجی تک نقطه ای [3]

برای جلوگیری از پاره شدن ورق و همچنین برای اینکه ورق بهتر شکل بگیرد، در زیر ورق یک صفحه پشتیبان<sup>4</sup> و در بالای ورق، ورق گیر<sup>5</sup> قرار می گیرد و لبه های ورق توسط ورق گیر مهار می شود. برنامه مسیر حرکت ابزار توسط نرم افزارهای ساخت به کمک کامپیوتر تهیه می شود. در روش SPIF زیر ورق خالی است و ابزار فقط از بالای ورق با آن تماس داشته و به آن نیرو وارد می کند. به این دلیل به این روش، تک نقطه ای و منفی نیز گفته می شود.

پژوهش هایی در خصوص شکل پذیری ورق های ترکیبی، SPIF ورق تک لایه و SPIF ورق های ترکیبی از قبل صورت گرفته است. هر چند نتایج تحقیقات به دست آمده در SPIF ورق تک لایه برای SPIF ورق های ترکیبی قابل به کارگیری نمی باشد [5].

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

<sup>4</sup> Backing Plate

<sup>5</sup> Blank Holder

<sup>1</sup> Tailor Welded Blanks (TWBs)

<sup>2</sup> Incremental Sheet Forming (ISF)

<sup>3</sup> Single Point Incremental Forming (SPIF)

در فرایند SPIF، جریان مواد توسط حرکت ابزار ماشین CNC کنترل می شود. رفتار ورق های ترکیبی در SPIF نسبت به آنچه که در سایر فرایندها اتفاق می افتد، کاملاً فرق دارد و تکنیک های متداول پیش بینی شکل پذیری همچون FLD بر پایه گلوبی شدن، برای پیش بینی شکست در فرایند SPIF، معتبر نمی باشند. از آنجا که شکل پذیری ورق های جوش دوخت شده فولادی در SPIF کمتر مورد توجه قرار گرفته است و همچنین با توجه به کاربرد گسترده این ورق ها در صنایع مختلف از جمله خودروسازی، هدف از این تحقیق، تعیین بیشترین عمق قابل شکل دهی ورق های ترکیبی تهیه شده از ورق پایه St12 و St14 با ضخامت های 1 و 1/5 میلی متر در فرایند SPIF قطعاتی به فرم هرم ناقص به روش تجربی می باشد. در این راستا ابتدا شکل پذیری ورق های پایه در فرایند SPIF ارزیابی می گردد. سپس، تأثیر چیدمان های مختلف جنس و ضخامت و نیز تأثیر راستای خط جوش نسبت به جهت نورد ورق های پایه بر روی شکل پذیری ورق های جوش دوخت شده مورد بررسی قرار می گیرد.

## 2- مراحل تجربی

### 2-1- تهیه ورق های پایه و ورق های جوش دوخت شده توسط لیزر

ورق پایه مورد استفاده در آزمایش ها از جنس فولاد St12 و St14 با ضخامت های 1 و 1/5 میلی متر شرکت فولاد مبارکه می باشد. با استفاده از این دو جنس و دو ضخامت، حداکثر می توان 10 ترکیب مختلف مطابق جدول 1 برای تهیه ورق های جوش دوخت شده در نظر گرفت.

جدول 1 چیدمان مختلف ورق ترکیبی از دو جنس St12 و St14 و دو ضخامت 1 و 1/5 میلی متری

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

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

شکل پذیری و منحنی حد شکل دهی ورق های ترکیبی در فرایندهای غیر تدریجی، پرداختند و نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که هر چه ورق های تشکیل دهنده ورق ترکیبی، دارای اختلاف ضخامت و اختلاف استحکام کمتری باشند، میزان شکل پذیری ورق ترکیبی افزایش یافته و منحنی حد شکل دهی بالاتر خواهد رفت. و در پایان نتایج تحلیلی را با نتایج حاصل از شبیه سازی عددی مقایسه کردند که نزدیکی خوبی داشتند. سیلوا و همکاران [3]، SPIF ورق های ترکیبی جوش دوخت شده با جوش اصطکاکی<sup>1</sup> از جنس آلومینیم را مورد مطالعه قرار دادند. در این پژوهش شکل پذیری 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 نشان دادند که با کاهش قطر ابزار در فرایند SPIF شکل پذیری افزایش پیدا می کند. 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. سی-یو- باتاریو و همکاران [10] در یک مطالعه بررسی کردند که کیفیت و موقعیت خط جوش بیشترین تأثیر را روی شکل پذیری ورق های ترکیبی در تست مکانیکی کشش داشته است.

آمبروگیو و همکاران [11] با ارائه یک استراتژی بر اساس SPIF معکوس و دو مرحله ای و با استفاده از آنالیز آماری در خصوص تأثیر پارامترهای فرایند بر روی دقت ابعادی، تحقیقاتی را انجام دادند. در این روش در مرحله اول SPIF 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 از سمت پشت شکل داده می شود که این کار باعث بالا بردن دقت ابعادی در قطعات فلزی می شود. راتناچان و همکاران [12] تحقیقی بر روی شکل پذیری ورق های ترکیبی از دو جنس St37 و SUS304 جوش دوخت شده توسط لیزر CO2 در فرایند SPIF انجام دادند. هدف از این تحقیق، بررسی شکل پذیری ورق ترکیبی St37 و SUS304 در ناحیه جوش برای شکل دهی یک نیم کره بود. میرنیا و همکاران [13] در یک تحقیق به بررسی SPIF چند مرحله ای 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 مرحله ای و بدست آوردن پارامترهای تعریف کننده آن بر اساس یک الگوریتم مناسب می توان نازک شدگی و زمان انجام فرایند را بهبود بخشید.

<sup>1</sup> Friction Stir Welding (FSW)

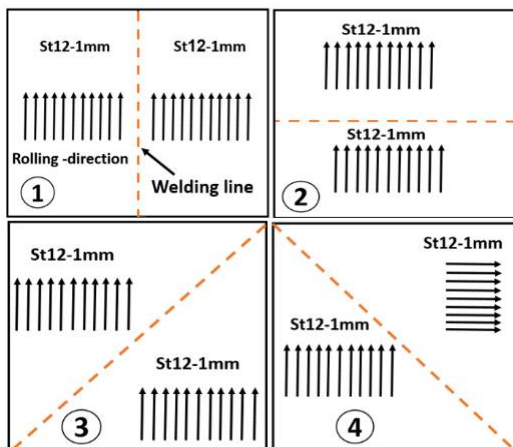


Fig. 3 The samples of the proposed weld line compared to the rolling direction for combination No. 1

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

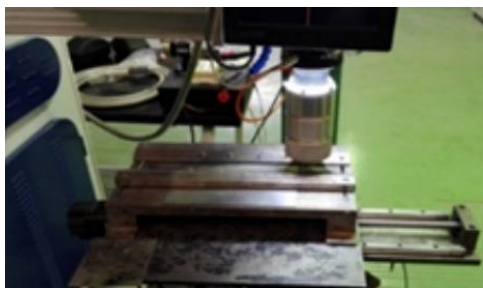


Fig. 4 Laser welding machine for preparing welded sheet

شکل 4 دستگاه جوش لیزر جهت تهیه ورق ترکیبی



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

شکل 5 نمونه های ورق ترکیبی تهیه شده در دو راستای خط جوش

## 2-2- آزمون تجربی SPIF ورق های ترکیبی

آزمون تجربی شامل SPIF ورق های پایه و ترکیبی برای شکل دهی قطعات هرم ناقص با زوایای دیواره ثابت برای مقادیر مختلف می باشد.

برای هر ترکیب از 10 مورد ذکر شده، تعداد بیشماری راستای خط جوش نسبت به جهت نورد<sup>1</sup> می توان در نظر گرفت. با این وجود، عموماً راستاهای نشان داده شده در شکل 3 از سوی محققان مورد بررسی قرار گرفته اند. در این مقاله، به منظور جمع بندی دقیق تر نتایج، موارد 1 و 3 در نظر گرفته شده اند. برای هر راستای خط جوش 10 قطعه و در مجموع 20 نمونه از ورق های جوش دوخت 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 جوش کاری بدون دخالت اپراتور و به صورت اتوماتیک انجام می گردید. فرایند جوش کاری 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 شکل دهی و جابجایی خط جوش در ورق های 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 شکل دهی را به همراه خواهد داشت، در حالی که افزایش سرعت جوش کاری و زمان پالس باعث بیشتر شدن عمق شکل دهی و بالاتر رفتن سطح منحنی حد شکل دهی خواهد شد. در پژوهش حاضر، پارامترهای مناسب برای جوش کاری ورق ها به صورت سعی و خطا و با تولید تعداد زیادی ورق ترکیبی به دست آمده اند که در جدول 2 آورده شده است. یادآور می گردد که برای جوش دو ورق با ضخامت مختلف، آزمایش های انجام شده نشان داده اند که پارامترهای ورق ضخیم تر مناسب نبوده و موجب ذوب شدن ناحیه جوش می گردد. از این رو، از پارامترهای ورق نازک تر استفاده شده است. با استفاده از پارامترهای به دست آمده، شرایط یکسان برای جوش کاری تمام قطعات ایجاد گردید. تمام قطعات بعد از جوش کاری، 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 نمونه های تهیه شده برای فرایند شکل دهی بدون عیب بوده اند. دو نمونه از ورق جوش دوخت شده به کمک لیزر و همچنین یک نمونه از عکس رادیوگرافی به ترتیب در شکل های 5 و 6 نشان داده شده است.

<sup>1</sup> Rolling Direction (RD)



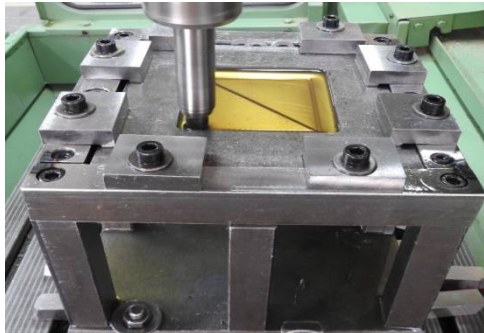


Fig. 7 Fixture, tools and setup required for the SPIF process

شکل 7 فیکسچر، ابزار و مجموعه مورد نیاز برای فرایند SPIF

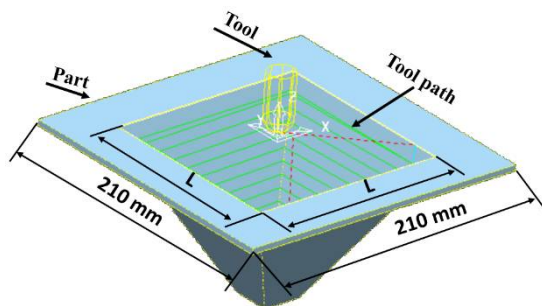


Fig. 8 The tool path in the truncated pyramid SPIF process

شکل 8 مسیر حرکت ابزار در فرایند SPIF هرم ناقص

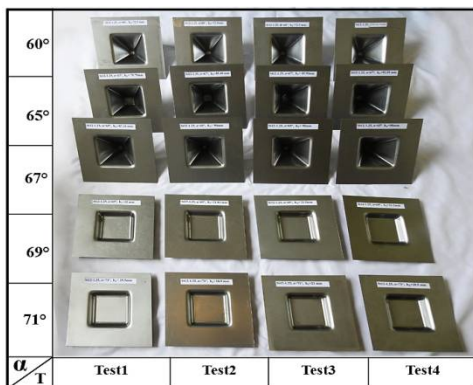


Fig. 9 Truncated pyramid Parts produced in SPIF of one layer sheet St12-1.5mm at fixed wall angles

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 میلی متر 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 و St14 با ضخامت 1/5 میلی متر شکل دهی بطور کامل انجام می شود، ولی از آن به بعد با افزایش زاویه دیواره، عمق پارگی کمتر از مقدار طراحی شده هرم ناقص خواهد بود.

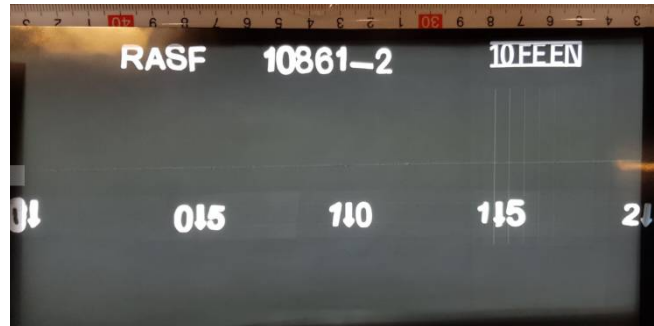


Fig. 6 The samples of the file of the weld zone

شکل 6 نمونه عکس رادیوگرافی از منطقه جوش

بدین منظور یک هرم ناقص با اندازه قاعده بزرگ 100×100 میلی متر و اندازه قاعده کوچک 16×16 میلی متر در نظر گرفته می شود که زاویه دیواره آن متناسب با ارتفاع هرم تغییر می کند. برای انجام فرایند SPIF ورق تک لایه، ابتدا ورق های اولیه با ابعاد 210×210 میلی متر که متناسب با ابعاد فیکسچر است، برش کاری می شود، سپس بر روی فیکسچر نگهدارنده ورق قرار داده می شوند. برای فرارگیری بهتر ورق، یک صفحه پشتیبان با ابعاد 210×210 میلی متر و ضخامت 8 میلی متر که حفره مربعی شکل به ابعاد تقریبی قاعده هرم در وسط آن ایجاد شده، در زیر آن و همچنین یک ورق گیر در بالای ورق قرار می گیرد و در نهایت ورق به کمک ورق گیر توسط چند عدد پیچ و رابند محکم می شود. ابزار مورد استفاده در این پژوهش، یک ابزار سر کروی از جنس کاربید تنگستن می باشد. 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 نرم افزار Powermill بصورت مارپیچ با گام عمودی 0/5 میلی متر تهیه شده است. در تمام مراحل اجرای این پژوهش نرخ پیشروی ابزار 1200 میلی متر 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 قاعده یکسان و با زاویه دیواره ثابت ( $\alpha$ ) از 60 تا 71 درجه شکل داده شد و برای هر زاویه 4 بار تکرار انجام گردید. نمونه هایی از این قطعات تولید شده هرم ناقص در SPIF ورق تک لایه St12 با ضخامت 1/5 میلی متر در شکل 9 نشان داده شده است.

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.

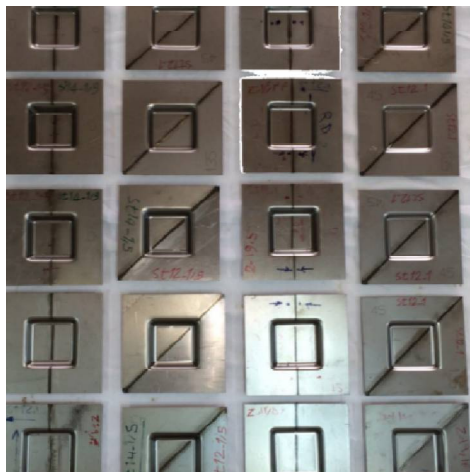


Fig. 10 Samples of parts formed in the form of a truncated pyramid in SPIF at two sides of the weld line.

شکل 10 نمونه های از قطعات شکل داده شده ورق های ترکیبی به فرم هرم ناقص در فرایند SPIF در دو راستای خط جوش

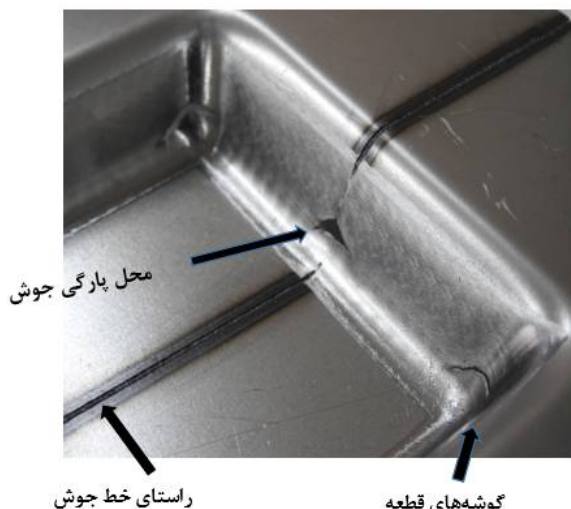


Fig. 11 The location of the fracture of the sheet St12/1-St14/1.5 in the SPIF of a truncated pyramid

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 ورق های جوش دوخت شده هم جنس از St12، ورق ترکیبی St12/1-St12/1.5 دارای عمق 15/35 میلی متر، ورق ترکیبی St12/1.5 دارای بیشترین عمق شکل دهی، و عمق شکل دهی ورق ترکیبی St12/1-St12/1.5 کمتر از دو ترکیب قبلی است. در مورد ورق St14 نیز چنین نتیجه ای قابل بیان است؛ با این تفاوت که عمق پارگی در ترکیب های مشابه اندکی بیشتر است.

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 شکل دهی	عمق شکل دهی (میلی متر)
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 میلی متر شکل دهی بطور کامل انجام می شود، ولی از آن به بعد با افزایش زاویه دیواره، عمق پارگی کمتر از مقدار طراحی شده هرم ناقص خواهد بود.

برای بررسی شکل پذیری تدریجی ورق ترکیبی، تعداد 20 قطعه از ورق های 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، شکل دهی این قطعات در محدوده زاویه دیواره بحرانی متوسط بدست آمده برای ورق های پایه یعنی 67 درجه انجام شده است. ورق های 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 میلی متر، بطور کامل شکل گرفته اند، که یک مورد از نتایج آن در جدول 3 آورده شده است.

نمونه هایی از قطعات شکل داده شده ورق های ترکیبی در دو راستای خط جوش در فرایند SPIF در شکل 10 نشان داده شده است. در تمام مراحل پژوهش، شکل دهی تا لحظه ای که ورق دچار پارگی شود ادامه پیدا می کند و عمق مربوط به آن ثبت می گردد. کیفیت جوش تأثیر بسزایی در مقدار عمق شکل دهی ورق های 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. نمونه ای از محل پارگی خط جوش ورق ترکیبی St12/1-St14/1.5 با خط جوش در راستای نورد که مربوط به آزمایش شماره 9 جدول 2 می باشد، در شکل 11 نشان داده شده است که در آن پارگی، عمود بر خط جوش و بعد از پاره شدن گوشه های قطعه اتفاق افتاده است، که نشان دهنده بالا بودن کیفیت جوش می باشد. عمق پارگی برای 10 ترکیب مختلف ورق ترکیبی مورد بررسی در این

St12/1 دارای عمق 11/65 میلی متر 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 شکل دهی بوده و در مقایسه با حالتی که خط جوش در راستای نورد است، حدود 16 درصد کمتر است. این موضوع برای ورق های جوش دوخت شده هم جنس St14 به این صورت است که ترکیب St14/1-St14/1 دارای عمق 12/90 میلی متر 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 می باشد که علت این امر، تفاوت در ضخامت دو ورق پایه می باشد. با مقایسه دو نمودار در شکل های 12 و 13 می توان گفت که عمق پارگی در حالت خط جوش در جهت نورد در تمام ترکیب های جدول 1 نسبت به حالت خط جوش 45 درجه بین 3 تا 25 درصد بیشتر می باشد.

در هر دو زاویه راستای خط جوش، برای ورق های جوش دوخت شده از St12 و St14 با ضخامت های غیر یکسان، عمق شکل دهی ورق های ترکیبی با ورق ضخیم تر 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 شکل دهی ورق در لحظه پارگی محاسبه گردید. نتایج به دست آمده نشان می دهد 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 میلی متر می شود. 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 می شود. در این حالت، ناحیه جوش در گوشه قطعه کار قرار می گیرد. به دلیل پایین بودن شکل پذیری ناحیه جوش و از طرفی وجود تنش های دو محوره در گوشه قطعه کار که تغییر شکل بیشتری در ورق ایجاد می کند، ورق در عمق های کمتری دچار پارگی می شود. همچنین، تغییر ضخامت ورق از 1 به 1/5 میلی متر 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.

بنابراین، برای ورق های جوش دوخت شده از دو ورق با جنس یکسان ولی ضخامت های متغیر، عمق ورق های هم ضخامت بیشتر است که با نتایج گرفته شده توسط دیگر محققان [6, 7] در شکل پذیری ورق های جوش دوخت شده به روش های سنتی و غیر تدریجی کاملاً مطابقت دارد. همچنین، در ورق های جوش دوخت شده غیرهمجنس از St12 و St14 ترکیب St12/1- St14/1 دارای کمترین و ترکیب St12/1.5- St14/1.5 دارای بیشترین عمق می باشد. بعلاوه، عمق پارگی برای 10 حالت مختلف ورق جوش دوخت 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.

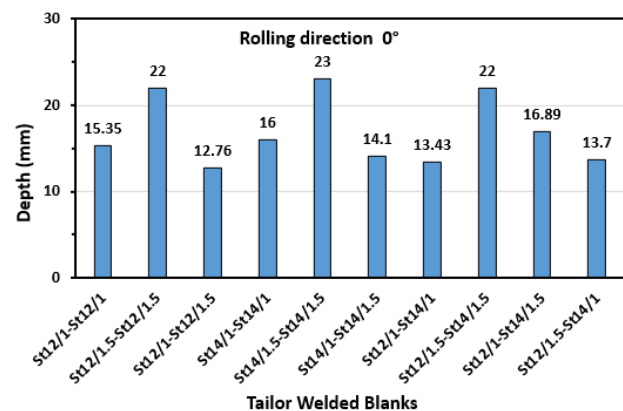


Fig. 12 the fracture depth column diagram for various TWBs in SPIF, Welding line in rolling direction

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

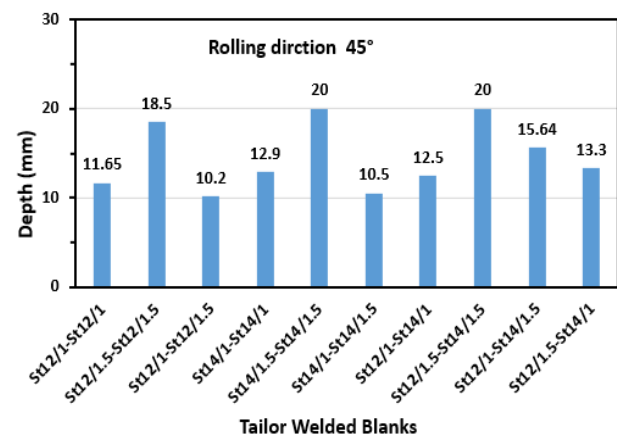


Fig. 13 the fracture depth column diagram for various TWBs in SPIF, Welding line along 45 degree

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

همان طور که در نمودار مشخص است، برای ورق های جوش دوخت شده هم جنس از St12، ورق ترکیبی St12/1-

جوش دوخت شده یکسان نبوده و ورق های جوش دوخت شده، زاویه حد شکل دهی خیلی کمتری نسبت به ورق های پایه دارند.

- برای ورق های جوش دوخت شده از دو ورق با جنس یکسان ولی ضخامت های متغیر 1 و 1/5 میلی متر، عمق ورق های هم ضخامت بیشتر است.

- در هر دو زاویه راستای خط جوش 0 و 45 درجه نسبت به راستای نورد، برای ورق های جوش دوخت شده از St12 و St14 با ضخامت های غیر یکسان، عمق شکل دهی ورق های ترکیبی با ورق ضخیم تر از St14، بیشتر است. در واقع، در این حالت شکل پذیری و سطح مقطع ورق پایه بیشتر شده است که باعث افزایش عمق شکست ورق ترکیبی خواهد شد.

- راستای خط جوش در عمق شکل دهی ورق های 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 می شود.

## 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

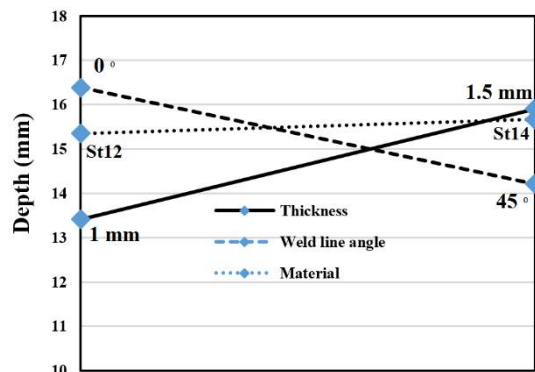


Fig. 14 The average effect of thickness, weld line angle and material on the fracture depth of sheet.

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

## 4- نتیجه گیری

در این پژوهش شکل پذیری ورق های جوش دوخت شده توسط لیزر از جنس St12 و St14 با ضخامت های 1 و 1/5 میلی متر در فرایند SPIF قطعانی به فرم هرم ناقص، به روش تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش ابتدا شکل پذیری ورق های پایه تک لایه St12 و St14 با ضخامت های 1 و 1/5 میلی متر در زاویه دیواره مختلف به صورت جداگانه بررسی شد و مشخص شد که زاویه حد شکل دهی برای ورق پایه St12 با ضخامت 1 و 1/5 میلی متر به ترتیب در حدود 66/5 و 67 درجه و برای ورق پایه St14 با ضخامت 1 و 1/5 میلی متر، به ترتیب در 67 و 68 درجه است. برای بررسی شکل پذیری ورق های جوش دوخت شده به کمک لیزر در فرایند SPIF، نمونه هایی از هرم ناقص از ورق ترکیبی با ترکیبات مختلف جنس، ضخامت های ذکر شده و راستای مختلف خط جوش در محدوده زاویه دیواره بحرانی متوسط بدست آمده برای ورق های پایه یعنی 67 درجه شکل دهی شد و مشخص گردید که عمق شکل دهی ورق ترکیبی به شدت کاهش می یابد و دلیل آن، این است که زاویه حد شکل دهی ورق ترکیبی کمتر از ورق های پایه بوده و باید در زاویه حد شکل دهی مخصوص خودش شکل دهی 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 میلی متر می شود. بنابراین، اثرگذارترین پارامتر ورودی ضخامت ورق و کم اثرترین پارامتر، جنس ورق شناخته شد.

- زاویه حد شکل دهی برای ورق های تک لایه و ورق های



- [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.
- 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.