مجله مهندسی ساخت و تولید ایران، پاییز ۱۳۹٤، دوره ۲، شماره ۳، ص‌ص ٤٥-٥٠

فصلنامه علمی پژوهشی

مهندسی ساخت و تولید ایران

www.smeir.org

بررسی فرایند شکل‌دهی با لیزر ورق‌های دولایه مس/فولاد

سیدمحمدحسین سیدکاشی[۱*]، محمد حسین‌پور گللو[۲]، یانگ هون‌مون[۳]

۱- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

۲- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی ، تهران

۳- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه ملی پوسان، بوسان

* بیرجند، صندوق پستی ۳۷۶- ۹۷۱۷۵، seyedkashi@birjand.ac.ir

کلیدواژگان

شکل‌دهی با لیزر
فولاد زنگ‌نزن
مس، توان لیزر
قطر پرتو
سرعت اسکن

چکیده

ورق‌های دولایه معمولاً از دو ورق فلزی با جنس‌ها و ضخامت‌های مختلف که به روش‌های مختلف به یکدیگر پیوند خورده‌اند، تشکیل شده‌اند. به دلیل دارا بودن ترکیبی از خواص مطلوب فلزات پایه، تمایل زیادی به استفاده ازاین‌گونه ورق‌ها در صنایع مختلف وجود دارد. در این تحقیق، ورق دولایه تشکیل شده از فولاد زنگ‌نزن و مس به‌صورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفت. این کامپوزیت فلزی می‌تواند با دارا بودن خاصیت ضد خوردگی و استحکام فولاد زنگ‌نزن، و برتری الکتریکی مس، در صنایع میکروالکترونیک استفاده شود. نمونه‌ها با استفاده از لیزر فایبر تحت تابش در یک مسیر مستقیم در راستای عرض ورق خم‌شده‌اند. اثر پارامترهای اصلی موثر بر فرایند از جمله تعداد عبور پرتو، سرعت اسکن، قطر پرتو و قدرت لیزر در شکل‌دهی خمشی ورق دولایه مورد بحث قرارگرفته، و با لایه‌های فولاد و مس تشکیل‌دهنده آن مقایسه شده است. نشان داده شده که لایه مس به دلیل دارا بودن هدایت گرمایی بالا، به‌شدت نرخ افزایش زاویه خم در هر پاس را تحت تأثیر قرار می‌دهد. نتیجه‌گیری شد که افزایش قدرت لیزر زاویه خم را افزایش، و افزایش سرعت اسکن و قطر پرتو، زاویه خم را کاهش می‌دهد.

Investigation of the laser forming of Cu/SS bilayer sheets

Seyed Mohammad Hossein Seyedkashi[1*], Mohammad Hoseinpour Gollo[2], YoungHoon Moon[3]

1- Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.
2- Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran
3- School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan, Republic of Korea
* P.O.B. 97175-376, Birjand, Iran, seyedkashi@birjand.ac.ir

Keywords

Laser forming
Stainless steel
Copper
Laser power
Beam diameter
Scanning velocity

Abstract

Bilayer clad sheets normally consist of two or more dissimilar metals of different thickness bonded together. Clad sheets are of great interest in different industries while having the advantages of all base metals. In this research, laser forming of Cu-stainless steel (SS) clad sheet is experimentally studied. This composite can be used in microelectronics industry while having the anti-corrosion and strength capability of stainless steel, and electrical superiority of copper. The specimens are bent using Ytterbium fiber laser irradiated on a straight path along the sheet width. The effects of main forming parameters including the number of passes, scanning velocity, beam diameter and laser power are discussed on bilayer sheet, and compared with its constituent steel and copper layers. It is found that the thin copper mid-layer strongly affects the rate of bending per pass due to its high thermal conductivity. It was concluded that the increase of laser power increases the bending angle, and increase of scanning velocity and beam diameter decreases the bending angle.

۱-مقدمه

در سال‌های اخیر، استفاده از ورق‌های دولایه موارد علاقه زیادی در صنایع مختلف ازجمله الکترونیک، خودرو، هوافضا و صنایع کشتی را پیدا کرده است. با ورق‌های دولایه می‌توان خواص محصول را به‌منظور بهبود خواص حرارتی، مکانیکی و الکتریکی آن مهندسی کرد. ورق‌های دولایه توسط اتصال فلزات غیرمشابه با ضخامت‌های مختلف و با استفاده از روش‌های متفاوت از قبیل نورد سرد، نورد گرم، جوشکاری انفجاری، اتصال با چسب و یا

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

S. M. H. Seyedkashi, M. Hoseinpour Gollo, YoungHoon Moon, Investigation of the laser forming of Cu/SS bilayer sheets, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 2, No. 3, pp. 45-50, 2015 (in Persian)

چفت‌وبست مکانیکی تولید می‌شوند. شکل‌پذیری و تغییر شکل ویژگی‌های مهمی هستند که بستگی به ترکیب ضخامت و موقعیت ورق‌ها نسبت به قالب نیز دارند [۱].

تکنولوژی شکل‌دهی به کمک لیزر، فرایند نسبتاً جدیدی است که در آن پرتو لیزر را از یک منبع لیزر خاص، یک یا بیش از یک بار از روی ورق یا لوله در امتداد یک مسیر مستقیم یا منحنی و با سرعت مشخص تابش‌دهی می‌کنند. در این فرایند، پرتو لیزر در موقعیت غیر کانونی برای القاء تنش‌های حرارتی با اعوجاج کنترل‌شده و بدون ذوب سطحی بکار می‌رود. اما مکانیسم‌های خم‌کاری لیزری به‌خوبی درک نشده‌اند و بطور دقیق قابل‌کنترل نیستند. این روش عمدتاً در صنایع ورق‌های فلزی استفاده می‌شود و به‌عنوان یک روش شکل‌دهی انعطاف‌پذیر مدرن که در آن هیچ نیروی مکانیکی خارجی یا قالب خاصی مورد نیاز نیست، شناخته می‌شود [۲]. بزرگ‌ترین مزیت این روش نسبت به روش‌های سنتی انعطاف‌پذیری بالا در ایجاد انواع خم و شکل‌های سه‌بعدی بر روی طیف گسترده‌ای از مواد است که باعث می‌شود آن را جایگزین منحصربه‌فردی برای روش‌های سنتی سازد [۳].

در فرایند شکل‌دهی لیزر، سطح ورق توسط پرتو لیزر تابش‌دهی می‌شود که منجر به ایجاد یک شیب حرارتی بین سطوح بالا و پایین و انبساط حرارتی به‌صورت یک خم کوچک در جهت خلاف منبع لیزر می‌شود. منطقه گرمِ زیرین که به‌طور مستقیم در تماس با پرتو لیزر نیست، به دلیل محدود شدن توسط مواد مجاور، تحت تنش فشاری و کرنش پلاستیک قرار می‌گیرد. با دور شدن اشعه لیزر، منطقه حرارت دیده سرد می‌شود و انقباض حاصل منجر به ایجاد خم در جهت پرتو لیزر می‌شود [۴]. پارامترهای کلیدی تأثیرگذار در فرایند شکل‌دهی به کمک لیزر شامل پارامترهای مربوط به لیزر همچون نوع، قدرت، طول موج، قطر پرتو، مسیر اسکن، تعداد پاس و سرعت اسکن، و پارامترهای قطعه‌کار مانند ابعاد هندسی و خواص حرارتی، فیزیکی و مکانیکی آن هستند [۵]. پژوهش‌های بسیاری روی تعیین، کنترل و تجزیه‌وتحلیل این پارامترها در سال‌های اخیر انجام شده است [۶]. مطالعات محدودی نیز بر شکل‌دهی به کمک لیزر ورق‌های دولایه گزارش شده است. ریاحی و همکاران [۷] شکل‌دهی با لیزر ورق‌های دولایه آهن/آلومینیوم را به روش تاگوچی با استفاده از لیزر Nd:YAG پالسی بررسی نمودند. شن و همکاران [۸] با استفاده از اجزای محدود به مطالعه رفتار مکانیکی ورق دولایه فلز/سرامیک در حین شکل‌دهی به کمک لیزر پرداختند. این ورق دولایه سرمت دارای ترکیبی از ویژگی‌های آلومینیوم و سرامیک است، یعنی با داشتن استحکام بالا و خواص ضد فرسایشی سرامیک، تمام مزیت‌های آلومینیوم را هم داراست. ریاحی و همکاران [۹] اثر شار حرارتی گاوسی و یکنواخت در شکل‌دهی با لیزر ورق‌های دولایه آلومینیوم/SiC مورد مطالعه قرار دادند.

به دلیل تعامل پیچیده بین گرادیان حرارتی و خواص ابعادی/ فیزیکی/حرارتی نمونه، تعیین نظری یا عددی پارامترهای طراحی و پیش‌بینی نتیجه نهایی ساده و دقیق نیست. اما با توجه به هزینه بالای تجهیزات و آزمایش‌های لیزر، روش‌های عددی و نظری با مفروضات ساده‌کننده برای تجزیه‌وتحلیل فرایند در ادبیات تحقیق ارائه شده‌اند. بااین‌حال، آزمایش تجربی قابل‌اطمینان‌ترین و دقیق‌ترین راه بررسی فرایند است. همچنین تعداد قابل‌توجهی از تحقیقات نیز لیزرهای CO_2 و Nd:YAG را به‌کار گرفته‌اند. در پژوهش حاضر به‌صورت تجربی به مطالعه لیزر شکل‌دهی با لیزر یک ورق دولایه مس/ فولاد زنگ‌نزن با استفاده از لیزر فایبر ایتربیم[1] در حالت موج پیوسته پرداخته شده است. لایه مس بر روی نتایج شکل‌دهی تأثیر می‌گذارد. اثرات پارامترها بر این ورق دولایه موردبحث قرار گرفته و با لایه‌های مس و فولاد تشکیل‌دهنده آن مقایسه شده است.

۲- مواد

بنا بر کاربردهای خاص را در صنایع الکترونیک، ورق دولایه مس/فولاد زنگ‌نزن برای این تحقیق انتخاب شده است. این کامپوزیت هر دو خاصیت هدایت الکتریکی بالای مس و مقاومت بالا در برابر حملات شیمیایی فولاد زنگ‌نزن را که آن را یک کاندید مناسب در محیط‌های شیمیایی می‌سازد، فراهم می‌کند. ضخامت کل ورق پوشش ۱ میلی‌متر که در آن لایه فولاد زنگ‌نزن دارای ضخامت ۰/۸ میلی‌متر و مس ۰/۲ میلی‌متر است. لایه فولاد زنگ‌نزن از جنس SUS430 و لایه مس از آلیاژ مس C11000 با خلوص ۹۹/۹٪ ساخته شده است. کیفیت ذاتی مس C11000 این اجازه را می‌دهد که به‌سادگی خم‌کاری، جوشکاری، لحیم‌کاری، سوراخ‌کاری و شکل‌دهی شود. SUS430 یک گرِید غیر سخت‌شونده از فولاد زنگ‌نزن است که مقاومت در برابر خوردگی و شکل‌پذیری بالا از ویژگی‌های خوب آن است. مقاومت SUS430 در برابر حمله اسید نیتریک اجازه استفاده از آن را در کاربردهای شیمیایی خاص می‌دهد. ورق دولایه C11000/SUS430 توسط فرایند نورد گرم تولید شد. ابعاد قطعه مستطیل شکل $100\times44\times1\ mm^3$ است که در شکل ۱ نشان

[1] Ytterbium fiber laser

داده شده. خواص مکانیکی و فیزیکی SUS430 و مس C11000 در جدول ۱ گزارش شده است.

۳- آزمایش‌های تجربی

لیزر مورد استفاده در این آزمایش‌ها از نوع فایبر ایتربیم (IPG YLR-200) تولید شده توسط IPG PHOTONICS با حداکثر توان ۲۰۰ W در ۶ A و با طول موج ۱/۰۷ µm است. حداکثر قطر پرتو لیزر در داخل هد دستگاه ۲۰ میلی‌متر و در موقعیت کانونی ۰/۰۸ میلی‌متر است. بنابراین، قطرهای مختلف پرتو با تغییر موقعیت عمودی میز ممکن می‌شود. در این تحقیق از حالت موج پیوسته (CW) استفاده شده است. اسکنر مورداستفاده برای مسیر، اسکنر SCANLAB hurrySCAN®20 است.

قطعه از یک طرف در یک فیکسچر ثابت شده، و پرتو لیزر در یک خط مستقیم از وسط ورق به‌موازات لبه آزاد آن تابیده می‌شود. بنابراین خم‌کاری تنها تحت تنش فشاری ناشی از انقباض منطقه گرم در طی زمان سرد شدن رخ می‌دهد. شکل ۲ قطعه‌کار را در حین فرایند شکل‌دهی نشان می‌دهد.

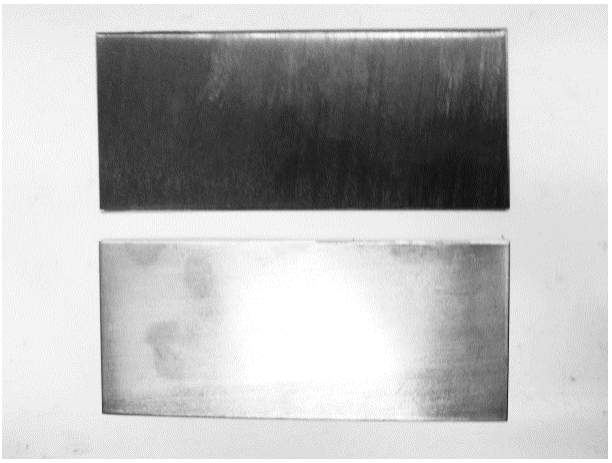

Fig. 1 Cu/SS clad sheet; Top: steel side, Bottom: copper side

شکل ۱ ورق دولایه Cu/SS؛ بالا از سمت فولاد، پایین از سمت مس

جدول ۱ خواص مواد

Table 1 Materials properties

پارامتر	Cu C11000	SUS430
چگالی (kg/m^3)	۸۹۰۰	۷۷۵۰
استحکام تسلیم (MPa)	۱۹۵	۳۴۵
مدول یانگ (GPa)	۱۱۷	۲۰۰
هدایت گرمایی در 500°C (W/m.K)	۳۵۰	۲۶/۳
نقطه ذوب، °C	۱۰۶۵	۱۴۲۵
مقاومت الکتریکی در 20°C (nΩ.m)	۱۷/۱	۶۰۰

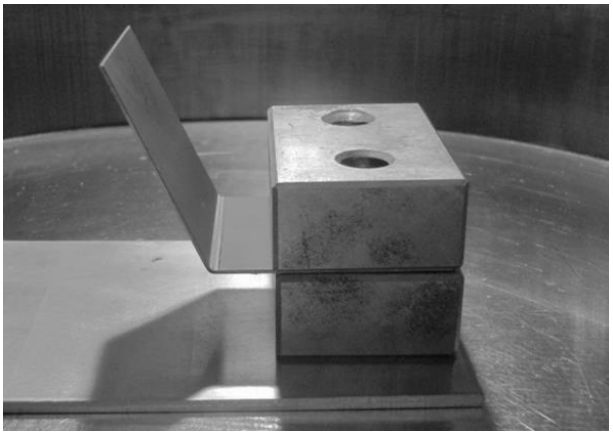

Fig. 2 Workpiece during the forming process

شکل ۲ قطعه‌کار هنگام شکل‌دهی

در این تحقیق، از مکانیسم TGM برای بیان رفتار مکانیکی حرارتی مواد استفاده شده است که در آن قطر پرتو لیزر در محدوده ضخامت ورق انتخاب می‌شود [۱۰]. در این مکانیسم، یک گرادیان حرارتی بزرگ در راستای ضخامت ایجاد می‌شود به‌طوری‌که انبساط حرارتی لایه فوقانی حرارت‌دیده، بسیار بالاتر از لایه‌های پایین‌تر است. انبساط حرارتی بیشتر با توجه به محدودیت انبساط آزاد در منطقه گرم توسط مواد حرارت ندیده مجاور آن تبدیل به کرنش‌های فشاری پلاستیک می‌شود. پس از عبور اشعه، منطقه گرم شروع به خنک شدن و انقباض می‌کند، و درنهایت تنش‌های فشاریِ القا شده، ورق را به سمت منبع حرارت خم می‌کند.

به‌منظور بررسی اثر پارامترها در این فرایند، پنج عامل مؤثر مورد بحث قرار گرفته‌اند؛ تعداد پاس، سرعت اسکن، قطر پرتو و توان لیزر. سه توان ۱۶۰، ۱۸۰، ۲۰۰ وات، سه قطر پرتو ۰/۷، ۰/۹، ۱/۳ میلی‌متر، و سه سرعت اسکن ۳/۸۲، ۷/۶۶، ۱۱/۶۲ میلی‌متر بر ثانیه برای انجام آزمایش‌ها و مقایسه‌ها انتخاب شده‌اند. تعداد ۱ تا ۲۰ پاس تابش‌دهی در هر مورد بررسی شده است.

در راستای افزایش خاصیت جذب لیزر فولاد زنگ‌نزن و مس و بهبود بهره‌وری فرایند، پوشش گرافیت ۳۳ به‌صورت اسپری بر روی سطح قطعه پاشیده شد. گرافیت ۳۳ به دلیل خواص جذب بالای آن، سهولت اعمال و در دسترس بودن استفاده می‌شود. این لایه برای جلوگیری از انعکاس لیزر سطح ورق را تیره می‌سازد. شکل ۳ این اسپری را نشان می‌دهد.

زاویه خم با کمک روش‌های پردازش تصویر محاسبه‌شد. یک دوربین در داخل محفظه دستگاه لیزر، دقیقاً عمود بر خط اسکن، ثابت شده و پس از هر مرحله تابش‌دهی یک تصویر گرفته شد.

Fig. 3 Graphite spray 33

شکل ۳ اسپری گرافیت ۳۳

تصویر نهایی با استفاده از تکنیک‌های پردازش تصویر به بردار[1] تبدیل، با فرمت DWG ذخیره و سپس زاویه خم در نرم‌افزار اتوکد محاسبه گردید. این روش بسیار دقیق و بدون خطای انسانی است.

۴- نتایج

هدف این تحقیق بررسی اثر لایه مس در زاویه خم نهایی و توزیع حرارت در طول فرایند شکل‌دهی بوده است. اثر لایه مس بر زاویه خم در شکل ۴ نشان داده شده است. در این آزمایش، یک‌بار تابش لیزر با توان ۲۰۰ وات و قطر لیزر ۱ میلی‌متر از سمت فولاد یک نمونه، و بار دیگر از سمت مس یک نمونه انجام شده است. مشاهده می‌گردد که پس از ۴۰ پاس تابش‌دهی لیزر از سمت مس، ورق دولایه فقط حدود ۱۱ درجه خم شده، درحالی‌که این مقدار با تابش‌دهی از سمت فولاد زنگ‌نزن برابر ۶۷ درجه است. یعنی در صورت تابش‌دهی از سمت مس در ورق دولایه مس/فولاد زنگ‌نزن مقدار زاویه خم در ۴۰ پاس تابش‌دهی ۱۶٪ حالت تابش‌دهی از سمت فولاد خواهد بود. دلیل این امر این است که مس خاصیت جذب لیزر بسیار پایینی در مقایسه با فولاد دارد. نتیجتاً هنگام شکل‌دهی با لیزر ورق‌های دولایه، تابش‌دهی باید از سمت ورق با قابلیت جذب بالاتر لیزر صورت گیرد.

سرعت اسکن یکی دیگر از پارامتر مؤثر بر زاویه خم است. مقدار سرعت اسکن باید به اندازه‌ای باشد که اجازه ایجاد گرادیان دمایی در راستای ضخامت ورق را بدهد. شکل ۵ نمودار اثر سرعت اسکن را بر زاویه خم تحت شرایط توان ۲۰۰ وات و قطر پرتو ۱ میلی‌متر نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل نشان داده شده، با افزایش سرعن اسکن، مقدار زاویه خم در هر پاس کاهش می‌یابد. در سرعت اسکن بالا، انرژی موردنیاز برای تغییر شکل پلاستیک ورق نمی‌تواند به‌خوبی جذب می‌شود و منجر به ایجاد تنش حرارتی کمتر، و تغییر شکل الاستیک خواهد بود و هیچ تغییر شکل پلاستیک قابل‌توجهی به دست نخواهد آمد.

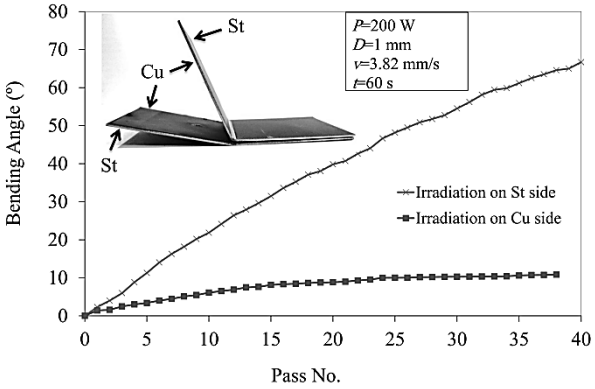

Fig. 4 Comparison of the bending angle under the laser irradiation from steel and copper sides

شکل ۴ مقایسه زاویه خم تحت تابش لیزر از سمت فولاد و سمت مس

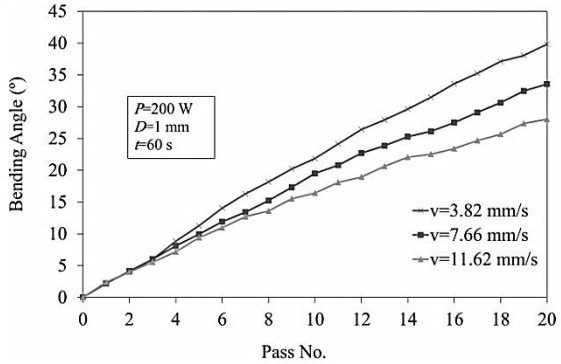

Fig. 5 The effect of scanning velocity on the bending angle

شکل ۵ اثر سرعت اسکن لیزر بر روی زاویه خم

مشاهده می‌شود که با سه برابر کردن سرعت اسکن از mm/s ۳/۸۲ به mm/s۱۱/۶۲ مقدار زاویه خمِ بدست آمده پس از ۲۰ پاسِ عبوری، ۱۲٪ کاهش می‌یابد.

پرتو لیزر حداکثر درجه حرارت را در نقطه کانونی خود ایجاد می‌کند. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، در مکانیسم TGM که مکانیسم‌های رایج در شکل‌دهی با لیزر است، قطر پرتو در محدوده ضخامت ورق انتخاب می‌شود. ازآنجا که ضخامت نمونه ۱ میلی‌متر است، سه قطر پرتو ۰/۷، ۰/۹ ، ۱/۳ میلی‌متر برای آزمایش انتخاب شدند. شکل ۶ اثر قطر پرتوی لیزر بر روی زاویه خم را تحت شرایط توان ۲۰۰ وات و سرعت اسکن mm/s ۳/۸۲ نشان می‌دهد. هرچقدر قطر پرتو کوچک‌تر باشد، به دلیل دمای بالاتر و ایجاد گرادیان حرارتی شدیدتر داخل قطعه و تنش‌های

[1] Vector

حرارتی بیشتر، زاویه خمِ بیشتری در هر مرحله حاصل خواهد شد. با افزایش قطر پرتو از ۰/۷ mm تا ۱/۳ mm، زاویه خمِ به‌دست‌آمده پس از ۲۰ پاس عبوری، حدود ۳۰٪ کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که پس از چند پاس با قطر پرتوهای کمتر از ۰/۷ mm با توان ۲۰۰ وات، به دلیل تمرکز بالای انرژی حرارتی، لایه فولاد فوقانی ذوب شد. لذا، قطرهای کمتر از ۰/۷ mm مشمول مقایسه نشدند.

فرایند خمش زمانی آغاز می‌شود که لایه سطحی به‌اندازه کافی برای تغییر شکل پلاستیک نرم شود. بنابراین برای هر قطر پرتو و سرعت مشخص، حداقل توانی موردنیاز است تا فرایند شکل‌دهی با موفقیت انجام شود. شکل ۷ نمودار اثر توان لیزر بر زاویه خم را تحت شرایط قطر پرتو ۱ میلی‌متر و سرعت اسکن 3.82 میلی‌متر بر ثانیه نشان می‌دهد. با افزایش توان، زاویه خم در هر پاس افزایش می‌یابد. مشاهده می‌شود که با ۲۵٪ افزایش توان، نرخ افزایش زاویه خم حدود ۵۱٪ بهبود یافته است.

اثر لایه مس بر میزان شکل‌پذیری ورق در شکل ۸ بررسی شده است. برای این منظور، زاویه خم در هر پاس برای ورق دولایه مس/فولاد زنگ‌نزن با ورق‌های تک‌لایه مس و تک‌لایه فولادِ تشکیل‌دهنده آن، تحت شرایط یکسانِ شکل‌دهی مقایسه شده‌اند.

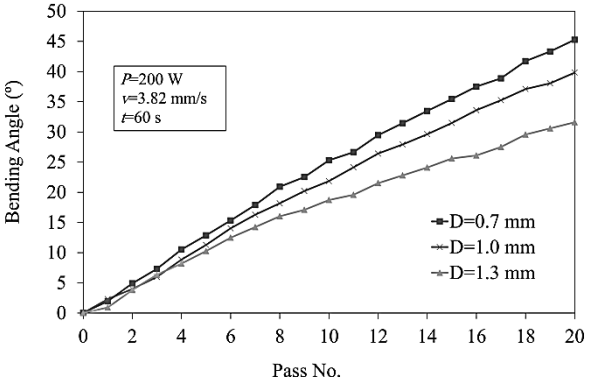

Fig. 6 The effect of beam diameter on the bending angle

شکل ۶ اثر قطر پرتو بر زاویه خم

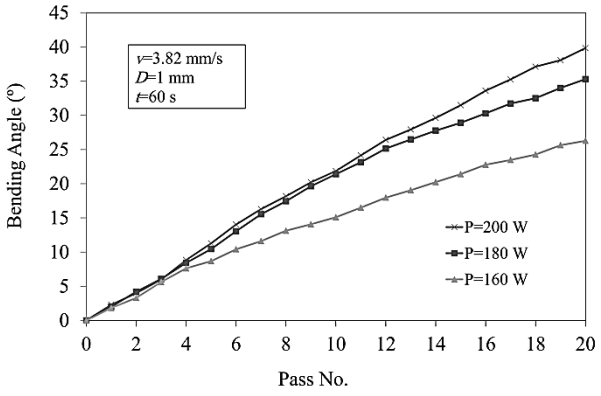

Fig. 7 The effect of laser power on the bending angle

شکل ۷ اثر قدرت لیزر بر زاویه خم

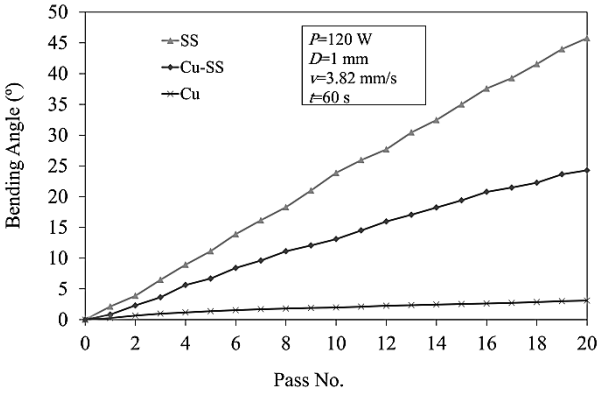

Fig. 8 Comparison of the bending angle changes in laser forming of Cu/SS bilayer sheet with its constituent layers

شکل ۸ مقایسه تغییرات زاویه خم در شکل‌دهی لیزر ورق دولایه مس/فولاد زنگ‌نزن با لایه‌های تشکیل‌دهنده آن

سه نمونه با ابعاد مشابه ($100\times44\times1\ mm^3$) استفاده گردید: یک ورق مس C11000، یک ورق فولاد زنگ‌نزن SUS430 و یک ورق دولایه مس/فولاد زنگ‌نزن. ورق یک‌لایه فولاد زنگ‌نزن تحت توان لیزر بالاتر از ۱۴۰ W پس از چند پاس سوخته و ذوب شد. بنابراین، برای این مقایسه از توان ۱۲۰ وات و قطر پرتو ۱ میلی‌متر استفاده گردید. دیده می‌شود که پس از ۲۰ پاس عبوری لیزر، ورق مس حدود ۳ درجه خم شده، درحالی‌که این مقدار برای ورق فولاد زنگ‌نزن SUS430 در حدود ۴۵ درجه و برای ورق دولایه مس/فولاد زنگ‌نزن ۲۴/۲ درجه است. این نشان می‌دهد که خم‌کاری ورق مس تنها پس از ۲۰ پاس در حدود ۶٪ ورقِ فولادِ تنهاست، درحالی‌که این مقدار برای ورق دولایه مس/فولاد زنگ‌نزن در مقایسه با ورقِ فولادِ تنها برابر ۵۳٪ است. این افت شدید نرخ افزایش زاویه خم به دلیل هدایت حرارتی بسیار بالای مس در مقایسه با فولاد زنگ‌نزن اتفاق می‌افتد. علیرغم این افت شدید، به دلیل ایجاد خواص الکتریکیِ بهبودیافته استفاده از این نوع ورق‌ها در صنعت الکترونیک

توجیه می‌یابد. علاوه‌بر این، با به‌کارگیری لیزر با توان‌های بالاتر می‌توان این نرخ کاهش جبران نیز نمود.

لازم به ذکر است که تمام پارامترهای مورد بحث باید به‌گونه‌ای تعیین شوند که ذوب سطحی رخ ندهد، چراکه شدیداً باعث کاهش ضریب انبساط حرارتی و در نتیجه زاویه خم می‌شود.

۵- جمع‌بندی

شکل‌دهی به کمک لیزر ورق دولایه مس/فولاد زنگ‌نزن به‌صورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفت. لایه زیرین مس C11000 با افزایش قابلیت هدایت الکتریکی ورق، کامپوزیتی مناسب برای استفاده در صنایع میکروالکترونیک و هوافضا فراهم می‌آورد. اثر پارامترهای اصلی فرایند شامل تعداد عبور، سرعت اسکن، قطر پرتو و توان لیزر بر زاویه خم مورد بررسی قرار گرفت. حداکثر زاویه خم ۶۶/۶۹ درجه تحت شرایط توان ۲۰۰ وات، سرعت اسکن ۳/۸۲ میلی‌متر بر ثانیه و قطر پرتوی 1 میلی‌متر به دست آمد. زاویه خم با کاهش سرعت اسکن و قطر پرتو دچار افزایش، و با افزایش توان لیزر دچار افزایش می‌شود. ۲۵٪ افزایشِ توان، بهره‌وری فرایند را حدود ۵۱٪ بهبود داد. با سه برابر شدن سرعت اسکن از ۳/۸۲ تا ۱۱/۶۲ میلی‌متر بر ثانیه، ۱۲٪ افت بهره‌وری در ۲۰ پاس اتفاق افتاد. با افزایش قطر پرتو از ۰/۷ تا ۱/۳ میلی‌متر، زاویه خم به‌دست‌آمده پس از ۲۰ پاس حدود ۳۰٪ کاهش یافت.

۶- تقدیر و تشکر

نویسندگان مراتب تشکر و قدردانی خود را از National Research Foundation of Korea (NRF) بابت حمایت از این تحقیق تحت گرنت شماره 2012R1A5A1048294 و همچنین اعضای آزمایشگاه فناوری‌های نوین تولید بابت همکاری در انجام آزمایش‌ها اعلام می‌دارند.

۷- مراجع

[1] L.K. Kim, T.X. Yu, Forming and failure behaviour of coated, laminated and and sandwiched sheet metals: A review, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 63, pp. 33-42, 1997.

[2] A.H. Roohi, H. Moslemi Naeini, M. Hoseinpour Gollo, M. Soltanpour, M. Abbaszadeh, On the random-based closed-cell metal foam modeling and its behavior in laser forming process, *Optics and Laser Technology*, Vol. 72, pp. 53–64, 2015.

[3] J. Kim, S.J. Na, 3D laser-forming strategies for sheet metal by geometrical information, *Optics and Laser Technology*, Vol. 41, pp. 843–852, 2009.

[4] M. Hoseinpour Gollo, S.M. Mahdavian, H. Moslemi Naeini, Statistical analysis of parameter effects on bending angle in laser forming process by pulsed Nd:YAG laser, *Optics and Laser Technology*, Vol. 43, pp. 475–482, 2011.

[5] M. Hoseinpour Gollo, G. Nadi, M. Mehdi, M. Abbaszadeh, Experimental and numerical study of spiral scan paths on cap laser forming, *Journal of Laser Applications*, Vol. 27, pp. 012002-1-9, 2015.

[6] D.P. Shidid, M. Hoseipour Gollo, M. Brand, M. Mahdavian, Study of effect of process parameters on titanium sheet metal bending using Nd: YAG laser, *Optics and Laser Technology*, Vol. 47, pp. 242–247, 2013.

[7] M. Riahi, M. Hoseinpour Gollo, S.N. Ameli Kalkhoran, Laser forming of bi-layer Fe/Al sheet by Nd: YAG laser, *Engineering Solid Mechanics*, Vol. 2, pp. 303-312, 2014.

[8] H. Shen, Z. Yao, J. Hu, Numerical analysis of metal/ceramic bilayer materials systems in laser forming, *Computational Materials Science*, Vol. 45, pp. 439–442, 2009.

[9] M. Riahi, M. Hoseinpour Gollo, S.N. Ameli Kalkhoran, Study the effect of Gaussian and Uniform heat flux on laser forming of Bi-layer sheets, *Mechanics & Industry*, Vol. 16, pp. 407:1-9, 2015.

[10] S.P. Edwardson, J. Griffiths, G. Dearden, K.G. Watkins, Temperature gradient mechanism: Overview of the multiple pass controlling factors, *Physics Procedia*, Vol. 5, pp. 53–63, 2010.