



مطالعه‌ی تجربی رفتار خوردگی ورق‌های چندلایه‌ی فلزی بعد از شکل دهی توسط لیزر

حامد دلفان ابازری¹، سیدمحمدحسین سیدکاشی^{2*}، محمد حسین پور گللو³

1- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

* بیرجند، صندوق پستی 97175/376، seyedkashi@birjand.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 10 مهر 1395

پذیرش: 16 آبان 1395

ارائه در سایت: 28 آذر 1395

کلید واژگان:

آزمون خوردگی

ورق چندلایه

شکل دهی توسط لیزر

ریز ساختار

چکیده

امروزه از ورق‌های چندلایه‌ی فلزی به منظور دستیابی به گستره‌ی وسیعی از خواص مکانیکی، فیزیکی، حرارتی و الکتریکی استفاده می‌شود. عبور پرتوی لیزر تغییرات دمایی شدیدی در ماده ایجاد می‌کند که می‌تواند منجر به تغییر خواص شیمیایی و ریزساختار آن شود. با توجه به کاربرد بسیار این مواد در محیط‌های شیمیایی و خورنده، جهت بررسی نحوه‌ی این تغییرات در این پژوهش، آزمون خوردگی بر روی ورق دولایه‌ی فولاد SUS304L/مس C11000 و سه‌لایه‌ی فولاد SUS430/مس C11000/فولاد SUS430 که در تعداد دفعات عبور مختلف قرار گرفته‌اند، انجام شده است. لیزر مورد استفاده از نوع فایبر ایتربیوم و سازوکار حاکم بر فرآیند، شیب دمایی است. نحوه‌ی تغییر ریزساختار توسط متالوگرافی آشکار گردیده است. با عبور پرتوی لیزر از روی ورق سه‌لایه، مقاومت خوردگی سطحی که لیزر از آن عبور کرده است به دلیل کوچک شدن اندازه‌ی دانه‌ی فازهای مارتنزیت و فریت جهت‌دار در ناحیه‌ی متأثر از حرارت فولاد SUS430 کاهش یافته است. در لایه‌ی مس و لایه‌ی دیگر فولاد به دلیل عمق نفوذ کوچک ناحیه‌ی متأثر از حرارت در ورق سه‌لایه، تغییری در ریزساختار و مقاومت خوردگی مشاهده نشده است. عبور پرتوی لیزر از روی ورق دولایه به دلیل وجود ریزساختار شامل آستنیت در فولاد SUS304L تغییری در مقاومت خوردگی و ریزساختار آن ایجاد نکرده است. عمق نفوذ ناحیه‌ی متأثر از حرارت در ورق دولایه تنها به بخش کوچکی از لایه‌ی فولاد محدود می‌شود؛ بنابراین در مس تغییر ریزساختار و به طبع آن تغییر مقاومت خوردگی ایجاد نشده است و خوردگی در سراسر لایه‌ی مس تمامی نمونه‌ها یکسان است.

Experimental study on corrosion behavior of multi-layered sheet metals after laser forming

Hamed Delfan Abazari¹, Seyed Mohammad Hossein Seyedkashi^{2*}, Mohammad Hoseinpour Gollo²

1- Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

2- Faculty of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran.

* P.O.B. 97175/376, Birjand, Iran, seyedkashi@birjand.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 01 October 2016
Accepted 06 November 2016
Available Online 18 December 2016

Keywords:
Corrosion test
Multi-layered sheet
Laser forming
Microstructure

ABSTRACT

Nowadays, multilayered sheet metals are used in order to achieve a wide range of favorite mechanical, physical, thermal and electrical properties. The laser beam passage over the sheet creates extreme temperature changes which can lead to a change in chemical properties and microstructures. Due to the wide application of these materials in chemical and corrosive environments, corrosion tests were carried out on two-layered SUS304L/copper C11000 and three-layered SUS430/copper C11000/steel SUS430 sheets subjected to various laser passes. Ytterbium fiber laser is used and the governing mechanism during the process is TGM. The changes of microstructures were revealed by metallography. Corrosion resistance of steel layer in three-layered sheet subjected to laser was dropped due to the martensite and oriented ferrite grain size reduction in HAZ. There is no change in microstructure and corrosion behavior of copper layer and the second steel layer due to the HAZ low penetration depth. There is no change in microstructure and corrosion behavior of steel layer in two layered sheet due to the austenitic microstructure. Penetration depth of HAZ in two-layered sheet is limited to a small part of its steel cross section. So, there is no change in microstructure and corrosion behavior of copper, and corrosion is the same all over the copper layer in all specimens.

1- مقدمه

است که در صنایع مختلف از قبیل کشتی‌سازی، خودروسازی، میکرو الکترونیک و هوا فضا کاربرد دارد [1].

مطالعات محدودی بر روی رفتار خوردگی ورق‌های فلزی پس از فرآیندهای شکل دهی انجام شده است. زو و همکاران [2] رفتار خوردگی

شکل دهی توسط لیزر یک روش جدید و کارآمد برای ساخت قطعات صنعتی مختلف است که بدون تماس و با ایجاد تنش‌های حرارتی تغییر شکل ایجاد می‌کند. این روش یک فن‌آوری نوین در تولید قطعات به صورت ورق و لوله

فولاد زنگ‌زن خواص منحصر به فردی ارائه می‌دهد. ترکیب این دو ماده باعث ایجاد ورقی می‌شود که علاوه بر مقاومت در برابر حمله‌ی شیمیایی، هدایت حرارتی و الکتریکی بالایی نیز دارد. با توجه به افزایش دمای شدید که در فرآیند شکل‌دهی با لیزر ایجاد می‌شود، ترکیب مس با فولاد زنگ‌زن می‌تواند تغییرات دمایی را در طی فرآیند تحت تأثیر قرار دهد. برای بررسی این موضوع، آزمون افشانه آب و نمک بر روی نمونه‌های مختلف تولید شده صورت پذیرفت و نتایج مورد بحث و بررسی قرار گرفت.

2- مواد

ورق دولایه از فولاد زنگ‌زن SUS304L و مس C11000 تشکیل شده است. ضخامت لایه‌ی فولاد 0.8 میلی‌متر و مس 0.2 میلی‌متر است. ورق سه‌لایه متشکل از دو لایه‌ی بیرونی فولاد زنگ‌زن SUS430 به ضخامت 0.18 میلی‌متر و لایه‌ی میانی مس C11000 با ضخامت 0.14 میلی‌متر است. شکل 1 ورق‌های دو و سه‌لایه استفاده شده را به تصویر می‌کشد. ابعاد در این شکل بر حسب میلی‌متر بیان شده‌اند. جدول 1 ترکیب شیمیایی فولادهای مورد استفاده را ارائه می‌کند. ترکیب شیمیایی مس نیز به صورت مس با خلوص 99.9% است.

3- روند انجام آزمایش‌ها

به دلیل رابطه‌ی پیچیده‌ی بین شیب دمایی و خواص فیزیکی، حرارتی و ابعادی نمونه، تعیین نظری یا عددی پارامترها و پیش‌بینی نتیجه‌ی نهایی ساده و دقیق نخواهد بود. پارامترهای مختلفی بر روی فرآیند شکل‌دهی توسط لیزر تأثیر دارند. این پارامترها را می‌توان در دو دسته‌ی کلی پارامترهای لیزر (نوع، توان، سرعت، قطر پرتو و تعداد دفعات عبور) و پارامترهای ماده (پارامترهای فیزیکی، شیمیایی و هندسه‌ی ورق) تقسیم‌بندی کرد. با توجه به تعدد پارامترهای دخیل در فرآیند می‌بایست تعداد محدودی از آن‌ها متغیر و مابقی ثابت در نظر گرفته شوند. با توجه به اینکه هر بار عبور پرتوی لیزر تنها تغییر شکل کوچکی در ماده ایجاد می‌کند، استفاده از این فرآیند در کاربردهای عملی، تعداد دفعات عبور لیزر زیادی را می‌طلبد.

لیزر مورد استفاده از نوع فایبر ایتربیوم² است که با دستگاه لیزر مدل آی‌بی‌جی وای‌ال‌آر-200³ ساخت شرکت آی‌بی‌جی فتونیکس⁴ کشور آلمان

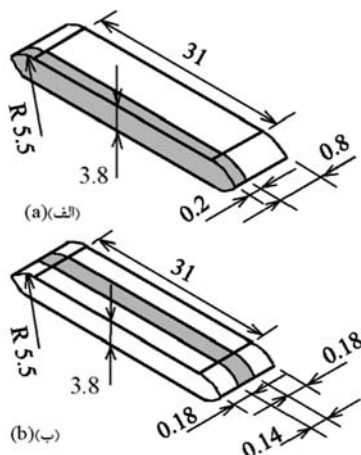


Fig. 1 Test specimens; (a) two layered sheet (b) three layered sheet
شکل 1 نمونه‌ی آزمون؛ (الف) ورق دولایه، (ب) ورق سه‌لایه

پوشش نیکل را به صورت الکتروشیمیایی و آزمون افشانه‌ی آب و نمک بررسی کردند. نتایج تجربی آزمون افشانه‌ی آب و نمک نشان می‌دهد که استحکام پیوند کاهش یافته است. پالم و کریگ [3] مقاومت خوردگی آلیاژهای آهن/آلومینیوم را توسط آزمون افشانه‌ی آب و نمک مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج حاکی از آن است که مقاومت خوردگی با افزایش آلومینیوم تا 30% افزایش می‌یابد. ژیانگ و همکاران [4] رفتار خوردگی آلیاژ منیزیم را تحت آزمون افشانه‌ی آب و نمک با محلول‌های متفاوت توسط نرخ کاهش وزن، خواص مکانیکی پسماند، میکروسکوپ الکترونی روبشی، پراش اشعه‌ی ایکس و قطبش¹ مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که نوع نمک نقش حیاتی در آغاز خوردگی این آلیاژ ایفا می‌کند. حسین‌پور گیلو و کلخوران [5] با استفاده از دو روش افشانه‌ی آب و نمک و قطبش، رفتار خوردگی ورق دولایه‌ی آهن/آلومینیوم را پس از شکل‌دهی توسط لیزر بررسی کردند. نتایج ایشان حاکی از این بود که مقاومت خوردگی به واسطه‌ی افزایش اندازه‌ی دانه، افزایش یافته است.

در زمینه‌ی بررسی ریزساختار ورق‌های شکل‌دهی شده توسط لیزر نیز مطالعات محدودی وجود دارد. راموس و همکاران [6] تغییرات ریزساختار و خواص مکانیکی (میکرو سختی) ورق از جنس AA2024-T3 که توسط لیزر CO₂ پردازش شده است را بررسی کردند. با انتخاب پارامترهای مختلف لیزر تبلور مجدد در مکان‌های مختلف در راستای ضخامت ماده بررسی شده است. با افزایش شدت پرتوی لیزر کوچک‌تر شدن اندازه‌ی دانه پس از تبلور مجدد مشاهده گردید. چن و همکاران [7] با استفاده از لیزر CO₂ تغییرات حاصل از به‌کارگیری پرتوی لیزر با چگالی انرژی مختلف بر روی ریزساختار نمونه‌ای از جنس Ti-6Al-4V در ابعاد مختلف را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش چگالی انرژی، اندازه‌ی دانه‌ی بتا افزایش یافته است. شن و یائو [8] خواص مکانیکی و ریزساختار نمونه‌هایی از جنس فولاد کم‌کربن با 0.1 درصد وزنی کربن که در معرض لیزر CO₂ قرار گرفته‌اند را مورد مطالعه قرار دادند. تغییری در ریزساختار نمونه‌ها مشاهده نشده است. ناپفر و مور [9] تغییرات خواص مکانیکی و ریزساختار فولاد کم‌کربن و آلومینیوم را پس از شکل‌دهی توسط لیزر CO₂ بررسی کردند.

امروزه به منظور به‌دست آوردن خواص مکانیکی ترکیبی دلخواه، از ورق‌های چندلایه به صورت گسترده استفاده می‌شود. این ورق‌ها ترکیبی از خواص مواد تشکیل‌دهنده‌ی خود را ارائه می‌دهند که در نهایت باعث بهبود کارکرد آن‌ها در محیط کاری مورد نظر می‌شود. در ورق‌های چندلایه، هر لایه خواص فیزیکی و شیمیایی خود را حفظ می‌کند، اما لایه‌ها در کنار هم خواص مکانیکی، حرارتی و الکتریکی جدیدی را ارائه می‌دهند که توسط هر لایه به تنهایی قابل حصول نیست.

با توجه به کاربرد گسترده‌ی این ورق‌ها در صنایع میکروالکترونیک، هوافضا و نظامی، بررسی تغییر مقاومت در برابر خوردگی این ورق‌ها در اثر عملیات شکل‌دهی اهمیت فراوانی دارد. در این پژوهش از ورق‌های چندلایه با ترکیب فولاد زنگ‌زن و مس استفاده شده است. ورق دولایه‌ی فولاد زنگ‌زن/مس و سه‌لایه‌ی فولاد زنگ‌زن/مس/فولاد زنگ‌زن در معرض لیزر فایبر ایتربیوم با تعداد دفعات عبور مختلف قرار گرفته است. فولاد زنگ‌زن به دلیل استحکام و قابلیت شکل‌دهی بالا و مقاومت به خوردگی مناسب مصارف بسیاری در صنعت دارد. از طرفی مس با هدایت حرارتی و الکتریکی بسیار بالا نسبت به فولاد، درصد ازدیاد طول مناسب و استحکام پایین، در ترکیب با

² Ytterbium fiber

³ IPG YLR-200

⁴ IPG PHOTONICS

¹ Polarization

جدول 1 ترکیب شیمیایی فولاد

عنصر	Table 1 Chemical composition of steel			
	SUS430		SUS304L	
C	بیشینه	کمینه	بیشینه	کمینه
Mn	0.12	-	0.03	-
Si	1.00	-	2.00	-
P	-	-	0.75	-
S	1.00	-	0.045	-
Cr	0.030	-	0.030	-
Ni	18.0	16.0	20.0	18.0
N	0.5	-	12.0	8.0
	-	-	0.1	-

جدول 2 پارامترهای فرآیند

Table 2 Process parameters			
ورق سه‌لایه	ورق دولایه	پارامتر	
200	200	توان (W)	
3.82	3.82	سرعت (mm/s)	پارامترهای ثابت
0.5	1	قطر پرتو (mm)	
60	60	زمان مکث (s)	
10, 20, 30, 40	10, 20, 30, 40	تعداد دفعات عبور	پارامتر متغیر

عوامل متعددی مثل زاویه‌ی پیش‌خمش و تنش‌های پسماند وابسته است. لذا این سازوکار در شکل‌دهی ورق کم‌تر مورد استفاده قرار می‌گیرد. در سازوکار کوتاه شدن⁶ زاویه‌ی خمشی در ورق ایجا نمی‌شود. البته زاویه‌ی کوچکی ایجاد می‌شود که می‌توان از آن صرف‌نظر کرد. در نتیجه برای حاکم شدن سازوکار شیب دمایی در فرآیند، در ورق‌های دو و سه‌لایه به ترتیب قطر پرتوی 1 و 0.5 میلی‌متر (برابر با ضخامت ورق) در نظر گرفته می‌شود.

در این پژوهش آزمون افشانه‌ی آب و نمک برای انجام آزمون خوردگی انتخاب شده است. این آزمون بر طبق شرایط استاندارد ASTM B 117 انجام شده است [11]. جدول 3 پارامترهای مختلف آزمون را ارائه می‌کند و شکل 3 نمونه‌های ورق دولایه حین آزمون افشانه‌ی آب و نمک را نشان می‌دهد.

به منظور آگاهی از ریزساختار و تغییرات آن در پی فرآیند شکل‌دهی توسط لیزر، نمونه‌های ورق دولایه و سه‌لایه تحت متالوگرافی قرار گرفته‌اند. میکرو اچ فلزات تحت استاندارد ASTM E 407-2015 انجام شده است [12]. تصاویر میکروسکوپ نوری هم طبق استاندارد ASTM E 883-11 تهیه شده است. برای تعیین اندازه‌ی دانه از استاندارد ASTM E 112-2013 استفاده شده است [13]. محلول ظاهر کننده‌ی فولاد، گلیسرزیا و محلول ظاهر کننده‌ی مس HNO_3-H_2O است.

4- نتایج و بحث

آزمون با توجه به پیشروی خوردگی تا 100 ساعت ادامه پیدا کرده است. در ادامه، نتایج حاصل برای ورق‌های دولایه و سه‌لایه به صورت مجزا ارائه می‌شود.

4-1- ورق دولایه

شکل 4 نمونه‌های خوردگی ورق دولایه قبل و بعد از انجام 100 ساعت آزمون را نشان می‌دهد. در این شکل، S نشان‌دهنده‌ی سمت فولاد و C نشان‌دهنده‌ی سمت مس است. دو رقم بعدی تعداد دفعات عبور لیزر را بیان می‌کند.

همان‌طور که مشاهده می‌شود خوردگی در لایه‌ی مس به صورت

جدول 3 پارامترهای آزمون خوردگی

Table 3 Corrosion test parameters	
مقدار	پارامتر
23±2	دمای محیط (°C)
35	دمای محفظه (°C)
1-2	حجم محلول نمک (ML/HR.8CM ²)
1.03	گرانش مخصوص محلول نمک (GR/CM ²)
35±2	رطوبت (%)

⁶ Upsetting Mechanism

ایجاد شده است (شکل 2). این نوع لیزر علیرغم بازده بالا، مصرف توان کمی دارد. از پرتوی لیزر نوع موج پیوسته¹ استفاده شده است. بیشینه‌ی توان قابل‌دسترس، 200 وات در 6 آمپر و با طول موج 1.07 میکرومتر است. بیشینه‌ی قطر پرتوی لیزر در هد دستگاه 20 میلی‌متر و در موقعیت کانونی 0.08 میلی‌متر است. به منظور کنترل مسیر لیزر روی نمونه‌ها از روبش‌کننده‌ی مدل هاری‌اسکن@20² ساخت شرکت اسکن‌لب³ آلمان استفاده شده است.

با توجه به اینکه افزایش توان و کاهش سرعت، بیشینه‌ی زاویه‌ی خم را در شکل‌دهی توسط لیزر در پی خواهد داشت، معمولاً از بیشینه‌ی توان و کمینه‌ی سرعت دستگاه استفاده می‌شود و با افزایش تعداد دفعات عبور لیزر زاویه‌ی خم دلخواه حاصل می‌شود. لذا، اهمیت تعداد دفعات عبور پرتوی لیزر در شکل‌دهی ورق، باعث شد در این پژوهش این پارامتر متغیر در نظر گرفته شود، اما با این دید که تعداد آن به سمت کاربردهای عملی متمایل باشد [10]. همچنین تابش لیزر در ورق دولایه از سمت فولاد انجام شد تا بیشینه‌ی بازدهی به‌دست آید. علاوه بر این، برای افزایش میزان ضریب جذب ورق‌ها، از پاشش لایه‌ی از گرافیت روی سطح استفاده گردید. در نهایت، پارامترهای لیزر به صورت ارائه شده در جدول 2 انتخاب شده است.

انتخاب پارامترها به‌گونه‌ای است که سازوکار شیب دمایی⁴ در فرآیند شکل‌دهی با لیزر حاکم باشد. در اغلب فرآیندهای شکل‌دهی توسط لیزر هدف دستیابی به زاویه‌ی خم بیشینه است که این امر توسط سازوکار شیب دمایی تحقق می‌یابد. در سازوکار کمانش⁵ پیش‌بینی جهت خمش دشوار است و به



Fig. 2 Laser equipment

شکل 2 دستگاه لیزر

¹ Continuous Wave (CW)

² hurrySCAN@20

³ SCANLAB

⁴ Temperature Gradient Mechanism (TGM)

⁵ Buckling Mechanism

بررسی نمونه‌های مختلف از سمت فولاد نشان می‌دهد که هیچ‌گونه خوردگی که از خود فولاد آغاز شده باشد، در این لایه مشاهده نمی‌شود. مشاهدات حاکی از آن است که خوردگی ایجاد شده در لایه‌ی مس اندکی بر سطح فولاد انتشار پیدا کرده است. نواحی مشخص شده در نمونه‌های S/00، S/10، S/20 و S/30 این نوع خوردگی را نمایان می‌کنند.

شکل 5 ریزساختار ورق دولایه را نشان می‌دهد. عبور پرتوی لیزر از ورق دولایه هیچ‌گونه تغییر ریزساختاری ایجاد نکرده است؛ بنابراین نمونه‌ها از این منظر تفاوتی باهم ندارند. ریز ساختار تمامی نمونه‌ها در لایه‌ی فولادی آستنیت حاوی نواحی دوقلوبی و در لایه‌ی مسی محلول جامد مس حاوی نواحی دوقلوبی است.

شکل 6 تقسیم‌بندی سطح لایه‌ی فولادی نمونه‌ی با 30 بار عبور لیزر برای محاسبه‌ی اندازه‌ی دانه را نشان می‌دهد. در شکل 7 نحوه‌ی توزیع اندازه‌ی دانه در مناطق مختلف سطح فولادی نشان داده شده است. در نهایت

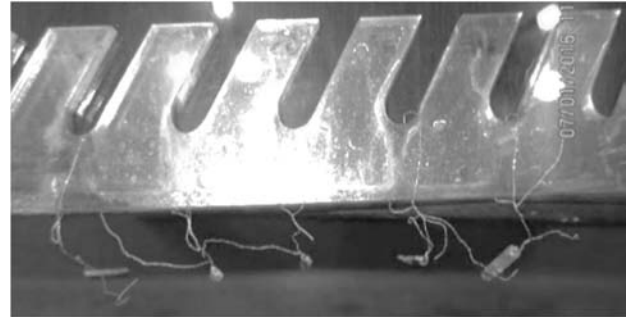
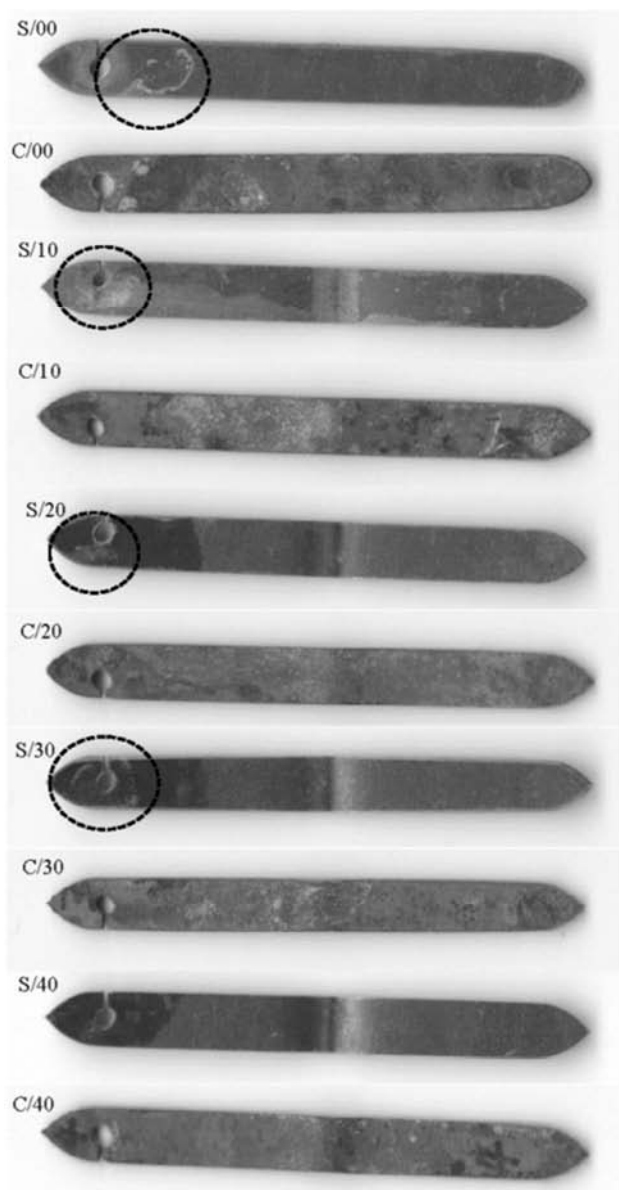


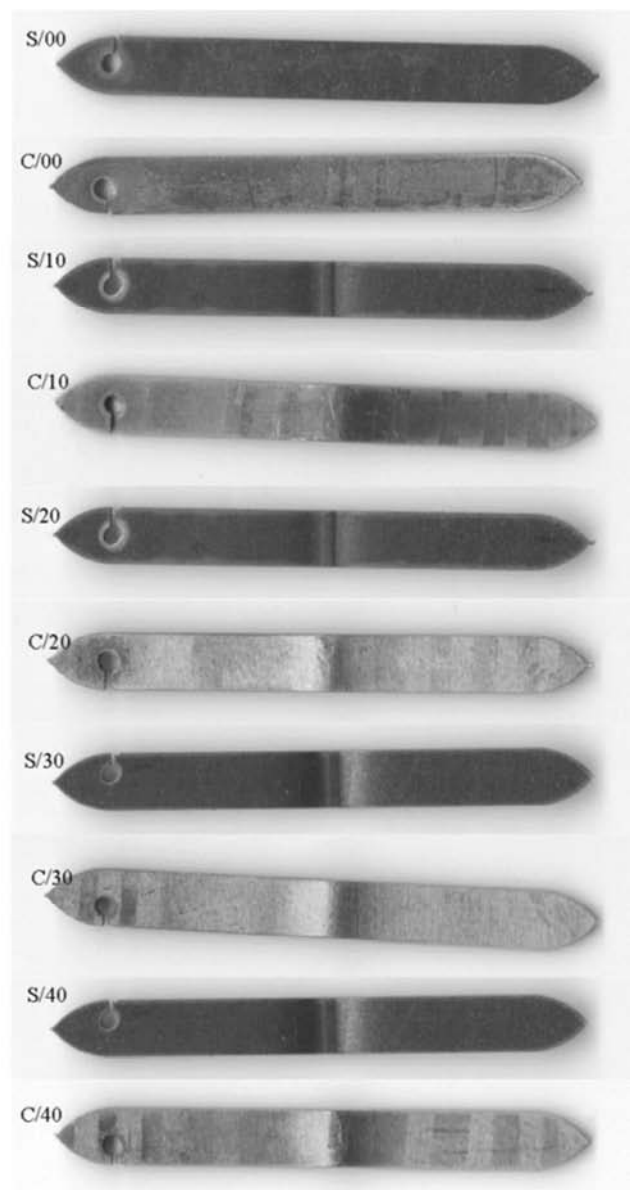
Fig. 3 Two layered sheet specimen

شکل 3 نمونه‌های ورق دولایه در حین آزمون

یکنواخت در سراسر نمونه رشد پیدا کرده است. از این منظر تفاوتی بین نمونه‌های با تعداد دفعات عبور لیزر مختلف وجود ندارد. درواقع مقدار و نحوه‌ی گسترده‌ی خوردگی در لایه‌ی مس تمامی نمونه‌ها یکسان است.



(ب) (ب)



(الف) (الف)

Fig. 4 Two layered sheet specimens; (a) before salt spray test, (b) after salt spray test

شکل 4 نمونه‌های ورق دولایه؛ (الف) پیش از آزمون افشانه‌ی آب و نمک، (ب) پس از آزمون افشانه‌ی آب و نمک

نواحی بدون وجود خوردگی کماکان در این لایه از ورق وجود دارند. خوردگی در سمت در معرض لیزر در تمامی سطح نمونه گسترش یافته است.

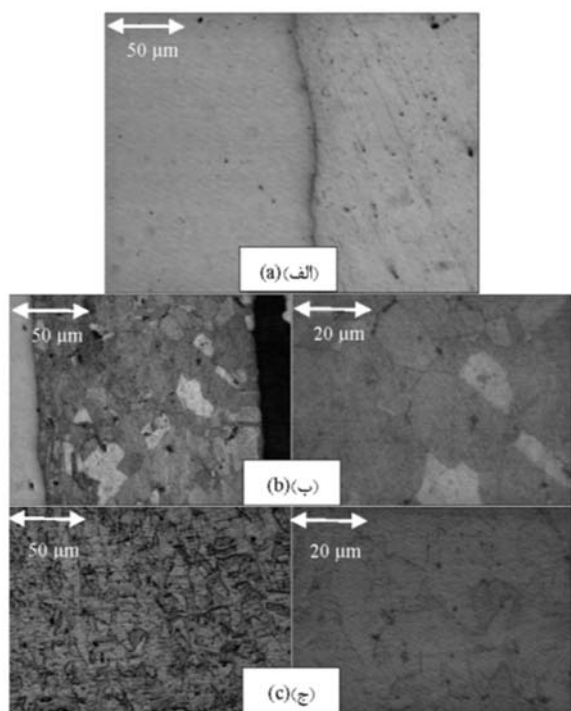


Fig. 5 Microstructure of two layered sheet in HAZ

شکل 5 ریزساختار ورق دولایه در ناحیه‌ی متأثر از حرارت

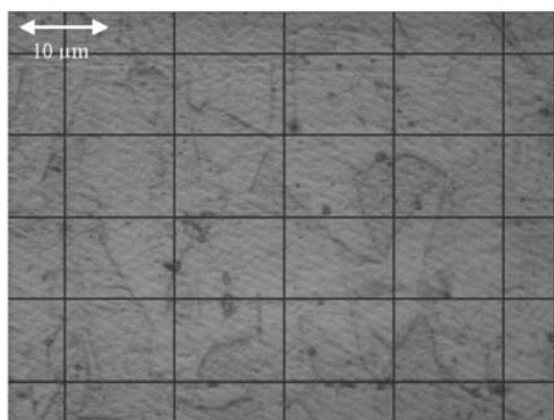


Fig. 6 Segmentation of steel surface in order to calculate the grain size

شکل 6 تقسیم‌بندی سطح لایه‌ی فولادی برای محاسبه‌ی اندازه‌ی دانه

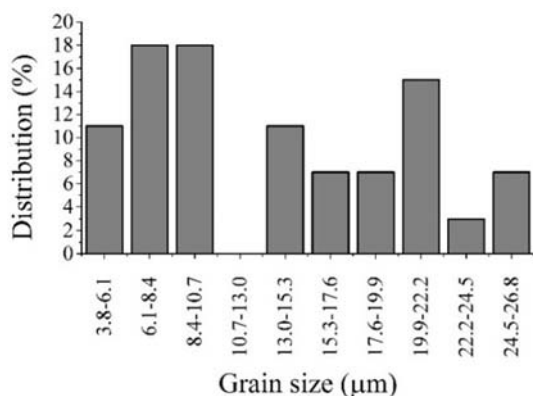


Fig. 7 Grain size distribution in different areas of steel surface

شکل 7 نحوه‌ی توزیع اندازه‌ی دانه در مناطق مختلف سطح فولادی

اندازه‌ی دانه در لایه‌های فولاد و مس به ترتیب 9 و 7 میکرومتر محاسبه شده است.

عبور پرتوی لیزر می‌تواند تغییرات سطحی زیادی مثل اکسید شدن ایجاد کند که روند خوردگی را تحت تأثیر قرار دهد. ملاحظه شد که خوردگی مس تمامی نمونه‌ها یکسان به نظر می‌آید، درحالی‌که خوردگی محسوسی در لایه‌ی فولادی ایجاد نشده است؛ بنابراین عبور پرتوی لیزر تأثیری بر روند خوردگی ورق دولایه نداشته است و این حسن بزرگی محسوب می‌شود. نکته‌ی قابل توجه، مقاومت خوردگی بسیار مناسب این نوع فولاد زنگ‌نزن است. بیش از 100 ساعت حضور در معرض محلول آب و نمک تقریباً هیچ خوردگی محسوسی در آن ایجاد نکرده است. به نظر می‌رسد ساختار آستنیتی فولاد SUS304L دلیل عمده‌ی مقاومت به خوردگی بسیار بالای آن باشد. حضور نیکل در این نوع فولاد زنگ‌نزن، آستنیت را در دمای محیط پایدار می‌کند. درواقع با هر بار افزایش و کاهش دما حضور نیکل مانع تغییر فاز در ریزساختار می‌شود؛ بنابراین ریزساختار آستنیتی در دمای محیط، پایدار می‌ماند و مقاومت به خوردگی بسیار بالا برای این نوع از فولاد زنگ‌نزن را رقم می‌زند.

4-2- ورق سه‌لایه

شکل 8 نمونه‌های خوردگی ورق سه‌لایه قبل و بعد از انجام 100 ساعت آزمون را نشان می‌دهد. رقم اول از چپ بیان‌گر دو سطح ورق سه‌لایه است. عدد 1 سمت در معرض لیزر و عدد 2 سمت دور از پرتوی لیزر را نشان می‌دهد. دو رقم دوم نام نمونه‌ها از چپ، تعداد دفعات عبور لیزر را بیان می‌کنند.

بررسی نمونه‌ها پس از 100 ساعت آزمون، حاکی از تفاوت خوردگی در دو سمت ورق سه‌لایه است. با توجه به یکسان بودن جنس لایه‌های فولاد در دو سمت ورق سه‌لایه، تنها تفاوت آن‌ها در عبور پرتوی لیزر است. بررسی نمونه‌ی بدون عبور لیزر (نمونه‌ی 1/00) نشان می‌دهد که خوردگی می‌تواند علاوه بر لایه‌ی فولاد، در لایه‌ی مس هم اتفاق بیفتد. با توجه به شدت خوردگی مس در ورق دولایه، به نظر می‌رسد آغاز خوردگی در نمونه‌ی سه‌لایه بدون عبور لیزر از مس باشد. به بیان دیگر خوردگی از مس آغاز می‌شود و به فولاد نشر پیدا کند. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود در دو سمت نمونه که به لایه‌ی میانی مس نزدیک‌تر هستند، خوردگی بیشتری مشاهده می‌شود.

نتایج برای نمونه‌ی با 10 بار عبور لیزر متفاوت است. در سمتی که لیزر از آن عبور نکرده است خوردگی کمی به صورت موضعی مشاهده می‌شود (نمونه‌ی 2/10). سمت در معرض لیزر دچار خوردگی شدیدتری شده است. آغاز خوردگی در این نمونه علاوه بر لایه‌ی مس، از ناحیه‌ی متأثر از حرارت نیز بوده است. عبور پرتوی لیزر تغییرات دمایی شدیدی در نمونه ایجاد می‌کند. این افزایش و کاهش دما با نرخ بسیار زیاد می‌تواند منجر به تغییر ریزساختار و شرایط سطحی نمونه ورق شود. به عنوان مثال می‌توان اکسیداسیون را از تغییرات سطحی ناشی از عبور لیزر نام برد. به وضوح کاهش کیفیت سطح ناشی از اکسیداسیون، مقاومت خوردگی را کاهش می‌دهد. درواقع خوردگی با سرعت بالاتری آغاز می‌شود و درنهایت به سایر نقاط ماده نشر پیدا می‌کند.

بررسی نمونه‌ی با 20 بار عبور لیزر از موضعی بودن خوردگی در لایه‌ی دور از پرتوی لیزر خبر می‌دهد (نمونه‌ی 2/20). همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود خوردگی تنها در بخشی از این لایه گسترش یافته است و



Fig. 8 Three layered sheet specimens; (a) before salt spray test, (b) after salt spray test

شکل 8 نمونه‌های ورق سه‌لایه؛ (الف) پیش از آزمون افشانه‌ی آب و نمک، (ب) پس از آزمون افشانه‌ی آب و نمک

ریزساختار ماده‌ی خام در لایه‌ی فولادی فریت با ذرات پراکنده‌ی کاربید و در لایه‌ی مسی محلول جامد مس همراه با نواحی دوقلویی است. روش محاسبه‌ی اندازه‌ی دانه همانند ورق دولایه است. اندازه‌ی دانه در لایه‌های فولادی و مسی به ترتیب 11 و 9 میکرومتر است. با هر بار عبور لیزر دمای سطح نمونه تا 830 درجه‌ی سانتی‌گراد بالا می‌رود. پس از زمان مکث 60 ثانیه و قبل از عبور مجدد پرتوی لیزر، دما تا 70 درجه‌ی سانتی‌گراد افت می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود عبور پرتوی لیزر باعث ایجاد تغییر ریزساختار و اندازه‌ی دانه در لایه‌ی فولادی در معرض لیزر شده است. هیچ‌گونه تغییر ریزساختار و اندازه‌ی دانه در لایه‌ی مس و فولاد دور از پرتوی

بخش‌های مشخص شده در نمونه‌ی 2/30، نواحی بدون خوردگی در این لایه‌ی نمونه را مشخص می‌کنند. همان‌طور که در نمونه‌ی 1/30 مشاهده می‌شود خوردگی به صورت یکنواخت تمام سطح این لایه را پوشانده است. طبق آن چه پیش از این بیان شد، یکی از آثار احتمالی عبور لیزر از روی سطح ماده تغییر ریزساختار است. به همین منظور نمونه‌ی با 30 بار عبور لیزر برای متالوگرافی انتخاب شد. ملاک انتخاب نمونه بر این اساس است که نمونه‌ی انتخابی تعداد دفعات عبور لیزر متوسطی نسبت به کمینه و بیشینه تعداد دفعات عبور نمونه‌های مختلف داشته باشد. شکل 9 ریزساختار ورق سه‌لایه با 30 بار عبور لیزر را نشان می‌دهد.

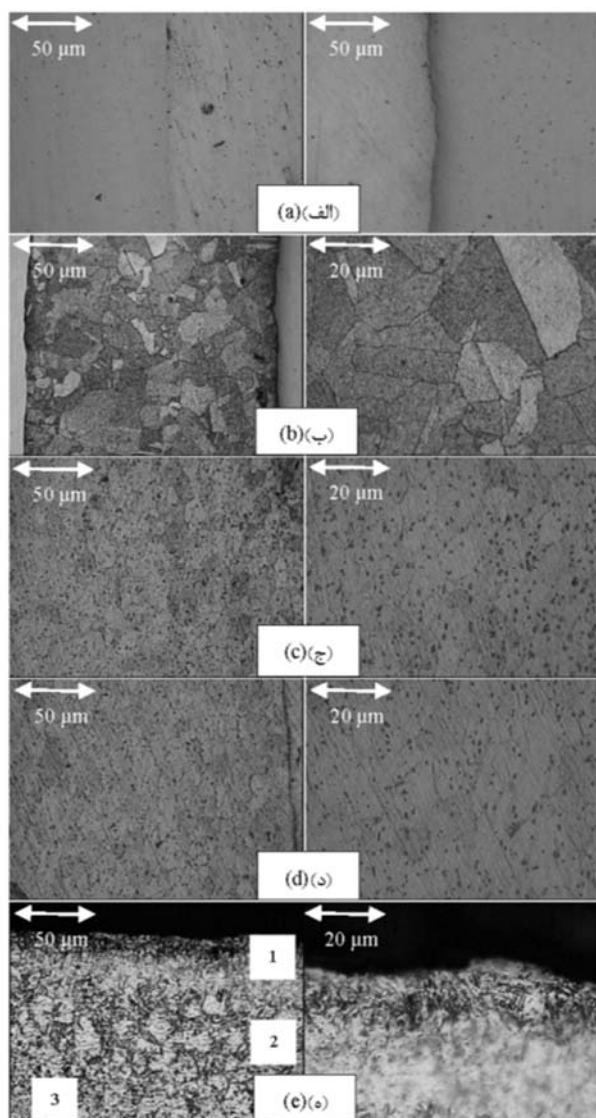


Fig. 9 Microstructure of three layered sheet with 30 laser passes; (a) layers boundary, (b) copper, (c) steel subjected to the laser, (d) steel away from the laser, (e) HAZ

شکل 9 ریزساختار ورق سه‌لایه با 30 بار عبور لیزر؛ (الف) مرز دولایه (ب) مس (ج) فولاد در معرض لیزر (د) فولاد دور از پرتوی لیزر (ه) ناحیه‌ی متأثر از حرارت

مس نیز محلول جامد مس حاوی نواحی دوقلوبی است. علاوه بر تعداد دفعات عبور لیزر، در صورت تغییر سایر پارامترها مثل توان، سرعت و قطر پرتو، ریزساختار نهایی آستنیت خواهد بود. اندازه‌ی دانه در فولاد و مس به ترتیب 9 و 7 میکرومتر است. با انجام آزمون خوردگی مشاهده می‌شود که هیچ خوردگی در سمت فولادی در نمونه‌های خام و نمونه‌های در معرض لیزر قرارگرفته اتفاق نمی‌افتد. خوردگی در لایه‌ی مس نیز به صورت یکنواخت در کل سطح نمونه گسترش یافته است.

انجام آزمون خوردگی بر روی ورق سه‌لایه نشان می‌دهد که با عبور پرتوی لیزر، مقاومت به خوردگی نمونه‌ها کاهش یافته است. در اثر عبور پرتوی لیزر فاز ماتنزیت بر روی سطح فولاد SUS430 در ناحیه‌ی متأثر از حرارت ایجاد شده است. دلیل این امر کاهش دما با سرعت بسیار بالا در ناحیه‌ی متأثر از حرارت است. همچنین اندازه‌ی دانه‌ی فریت کاهش یافته است. کمتر بودن اندازه‌ی دانه در فازهای ماتنزیت و فریت جهت‌دار دلایل عمده‌ی کاهش مقاومت خوردگی ورق سه‌لایه می‌باشند.

لیزر اتفاق نیفتاده است. در مرزهای سه‌لایه نیز هیچ‌گونه اختلاط یا گسیختگی مشاهده نمی‌شود. در واقع به دلیل کوچک بودن قطر پرتو، ابعاد ناحیه‌ی متأثر از حرارت بسیار کوچک است. عمق نفوذ این ناحیه در ورق تقریباً 0.15 میلی‌متر است. شکل 9e دو بزرگنمایی متفاوت از ناحیه‌ی متأثر از حرارت این نمونه را نشان می‌دهد. بخش‌های مختلف این ناحیه توسط اعداد 1، 2 و 3 مشخص شده‌اند. در قسمت بالایی ناحیه‌ی متأثر از حرارت (1)، ماتنزیت ایجاد شده است. این فاز که عمق بسیار کمی در لایه‌ی فولادی دارد (تقریباً 10 میکرومتر)، اندازه‌ی دانه‌ی بسیار کوچک‌تری نسبت به فریت ماده‌ی خام دارد. بزرگنمایی بیشتر این ناحیه، کوچک‌تر بودن اندازه‌ی دانه در این بخش نسبت به فریت ماده‌ی خام را بیشتر نمایان می‌کند. دلیل ایجاد ماتنزیت در سطح فولادی در معرض لیزر را می‌توان کاهش دما با نرخ بسیار زیاد دانست. به دلیل کوچک بودن قطر پرتو لیزر، تنها بخش کوچکی از ماده دچار افزایش دما می‌شود. با عبور پرتو لیزر و در مرحله‌ی سرد شدن، به دلیل اختلاف دمای بین ناحیه‌ی متأثر از حرارت و مواد اطراف، ماده به صورت خود کوئنچ عمل می‌کند و دما با سرعت بسیار بالاتری از سرعت تعادلی کاهش می‌یابد. این اتفاق شبیه سرد کردن ماده در آب عمل می‌کند. بنابراین در مرحله‌ی سرمایش، اجازه‌ی ایجاد تغییر ساختار بلوره‌ای به آستنیت ایجاد شده از فریت داده نمی‌شود و به جای ایجاد فریت در سرمایش تعادلی، ماتنزیت که حاصل سرمایش با نرخ زیاد است، ایجاد می‌شود. بخشی که با عدد 2 مشخص شده است، شامل ریزساختار فریت جهت‌دار است. منظور از جهت‌دار شدن دانه‌ها، کشیده و عمودی شدن آن‌ها است. دانه‌های فریت در این بخش اندازه‌ی دانه‌ی کمتری نسبت به ماده‌ی خام دارند. بخش 3 نیز فریت با ذرات پراکنده‌ی کاربید ارائه می‌دهد که همان ریزساختار ماده‌ی خام است.

همان‌طور که پیش از این بیان شد، سطحی که عبور پرتوی لیزر از آن اتفاق افتاده است خوردگی بیشتری نسبت به سمت دور از پرتوی لیزر ارائه داده است. با توجه به تغییرات ریزساختار ناحیه‌ی متأثر از حرارت، مهم‌ترین دلیل کاهش مقاومت خوردگی ورق سه‌لایه، کوچک‌تر شدن اندازه‌ی دانه‌ی آن است. در اثر کوچک‌تر شدن اندازه‌ی دانه، طول مرز دانه افزایش می‌یابد. مرز دانه نسبت به فاز فریت مقاومت به خوردگی کمتری دارد. در واقع نفوذ محلول آب و نمک در مرز دانه‌ها نسبت به فاز فریت با سرعت بیشتری اتفاق می‌افتد. بدیهی است که با افزایش طول مرز دانه‌ی در تماس با محلول آب و نمک، خوردگی با سرعت بیشتری آغاز می‌شود و در نتیجه گسترش آن در ماده در زمان 100 ساعت بیشتر خواهد بود.

5- نتیجه‌گیری

تغییر خواص شیمیایی و ریزساختار ورق‌های دولایه و سه‌لایه با ترکیب فولاد زنگ‌نزن و مس پس از شکل‌دهی توسط لیزر بررسی شده است. ورق دولایه به صورت فولاد SUS304L/مس C11000 و سه‌لایه نیز فولاد SUS430/مس C11000/فولاد SUS430 است. آزمون خوردگی به منظور آگاهی از تغییر مقاومت خوردگی نمونه‌های با تعداد دفعات عبور لیزر متفاوت، به کار گرفته شده است. نحوه‌ی تغییر ریزساختار با استفاده از متالوگرافی آشکار گردیده است.

بررسی‌های متالوگرافی در ورق دولایه از یکسان بودن ریزساختار تمام نمونه‌ها پس از 10، 20، 30 و 40 بار عبور لیزر خبر می‌دهد. دلیل این امر حضور نیکل در ترکیب شیمیایی این آلیاژ است. این عنصر آستنیت را در دمای محیط پایدار می‌کند و در نتیجه اجازه‌ی تغییر ریزساختار نمی‌دهد. این ریزساختار در فولاد SUS304L شامل آستنیت حاوی نواحی دوقلوبی و در

7- مراجع

- [1] Y. Shi, Y. Liu, P. Yi, J. Hu, Effect of different heating methods on deformation of metal plate under upsetting mechanism in laser forming, *Optics & Laser Technology*, Vol. 44, No. 2, pp. 486-491, 2012 .
- [2] C. Xu, L. Du, B. Yang, W. Zhang, Study on salt spray corrosion of Ni-graphite abrasible coating with 80Ni20Al and 96NiCr-4Al as bonding layers, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 205, No. 17, pp. 4154-4161, 2011 .
- [3] M. Palm, R. Krieg, Neutral salt spray tests on Fe-Al and Fe-Al-X, *Corrosion Science*, Vol. 64, pp. 74-81, 2012.
- [4] Q. Jiang, K. Zhang, X. Li, Y. Li, M. Ma, G. Shi, J. Yuan, The corrosion behaviors of Mg-7Gd-5Y-1Nd-0.5 Zr alloy under (NH₄)₂SO₄, NaCl and Ca (NO₃)₂ salts spray condition, *Journal of Magnesium and Alloys*, Vol. 1, No. 3, pp. 230-234, 2013.
- [5] M. H. Gollo, S. N. A. Kalkhoran, Experimental study on mechanical and chemical behaviors of bi-layer Fe/Al sheet after laser forming, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 38, No. 1, pp. 1-10, 2016.
- [6] J. A. Ramos, J. Magee, K. Watkins, Microstructure and microhardness study of laser bent Al-2024-T3, *Journal of Laser Applications*, Vol. 13, No. 1, pp. 32-40, 2001.
- [7] D. Chen, S. Wu, M. Li, Studies on laser forming of Ti-6Al-4V alloy sheet, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 152, No. 1, pp. 62-65, 2004.
- [8] H. Shen, Z. Yao, Study on mechanical properties after laser forming, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 47, No. 1, pp. 111-117, 2009.
- [9] S. Knupfer, A. Moore, The effects of laser forming on the mechanical and metallurgical properties of low carbon steel and aluminium alloy samples, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 527, No. 16, pp. 4347-4359, 2010.
- [10] S. H. Seyedkashi, M. H. Gollo, J. Biao, Y. H. Moon, Laser bendability of SUS430/C11000/SUS430 laminated composite and its constituent layers, *Metals and Materials International*, Vol. 22, No. 3, pp. 527-534, 2016.
- [11] ASTM B117, *Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus*, ASTM International, West Conshohocken, 1997.
- [12] ASTM E407, *Standard practice for microetching metals and alloys*, ASTM International, West Conshohocken, 2007.
- [13] ASTM E112-13, *Standard Test Methods for Determining Average Grain Size*, ASTM International, West Conshohocken, 2013.

افزایش ضخامت لایه‌ی مس در هر دو ورق، نحوه‌ی تغییر ریزساختار را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در واقع با افزایش ضخامت لایه‌ی مس، رشته‌ی دمایی در حین فرآیند شکل‌دهی توسط لیزر تغییر می‌کند. با توجه به هدایت حرارتی بسیار بالای مس در مقایسه با فولاد، با افزایش ضخامت لایه‌ی مس، انتقال حرارت از ناحیه‌ی متأثر از حرارت افزایش می‌یابد. در نتیجه افزایش دمای کمتری در لایه‌های فولادی در معرض لیزر ورق‌های دولایه و سه‌لایه اتفاق می‌افتد. در نهایت تغییر ریزساختار و همچنین تغییر مقاومت خوردگی کم‌تری نسبت به ماده‌ی خام ایجاد خواهد شد؛ بنابراین لایه‌ی مس با کاهش کردن تغییرات ناحیه‌ی متأثر از حرارت، تغییر مقاومت خوردگی را کاهش می‌دهد. بدیهی است افزایش ضخامت لایه‌ی مس در هر دو نوع ورق، تغییرات ریزساختار و همچنین تغییرات مقاومت خوردگی را کاهش می‌دهد.

با تغییر منبع لیزر می‌توان همین نتایج را تکرار کرد با این شرط که انرژی خط دو منبع یکسان باشد. در واقع در صورتی که انرژی خط در منابع متفاوت لیزر یکسان باشد، نتایج برای تمامی منابع لیزر قابل تعمیم است. می‌بایست توان و سرعت را در منبع لیزر جدید طوری تنظیم کرد که به انرژی خط مشابه با این پژوهش برای ورق‌های دو و سه‌لایه دست یافت. در این صورت نتایج قابلیت تکرار دارند.

6- تقدیر و تشکر

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از جناب آقای پروفسور بانگ‌هون مون که زمینه‌ی تهیه‌ی نمونه‌های اولیه‌ی آزمایشگاهی را فراهم کردند و همچنین اعضای آزمایشگاه فناوری‌های پیشرفته تولید در دانشگاه ملی پوسان، کشور کره جنوبی کمال تشکر را داشته باشند.