



ارزیابی تجربی خیز و اعوجاج زاویه‌ای ورق‌های فولادی st37 پس از گرمایش خطی القایی

سید جلال همتی^{1*}، حامد عباسی نژاد²

1- استادیار، مهندسی مکانیک ساخت و تولید، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک ساخت و تولید، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس

* بندر عباس، صندوق پستی 3995، hemmati@hormozgan.ac.ir

چکیده

یکی از روش‌های شکل‌دهی ورق‌های فلزی دارای انحنای دوبل، فرایند گرمایش خطی است. در این فرایند با گرم کردن ورق در راستای خطوط از پیش تعیین شده، به طور تدریجی به آن شکل می‌دهند. در گذشته عمدتاً از مشعل گازی به عنوان منبع گرمایش استفاده شده است. چون برای کنترل دقیق تغییر شکل ورق در طول فرایند، شار حرارت ناشی از منبع باید قابل کنترل باشد و این کار با مشعل آسان نیست یکی از جایگزین‌های مناسب، کویل القایی به عنوان منبع گرمایش است. در این پژوهش به ارزیابی تجربی فرایند گرمایش خطی القایی ورق‌های فولادی پرداخته شده است. با توجه به هزینه‌بر بودن آزمون‌های تجربی، پس از انتخاب متغیرهای مؤثر، آزمون‌ها به روش تاگوشی طراحی شده‌اند. ضخامت ورق، شدت جریان عبوری از کویل و سرعت حرکت کویل روی ورق، متغیرهای مورد مطالعه بوده‌اند. خیز و اعوجاج زاویه‌ای ورق نیز به عنوان خروجی‌های فرایند در نظر گرفته شده‌اند. از بین این متغیرها، ضخامت ورق بیشترین تأثیر را بر میزان خیز و اعوجاج زاویه‌ای ورق دارد. شدت جریان در مرتبه دوم اهمیت است. در بازه در نظر گرفته شده برای سرعت کویل، ضمن تأیید تأثیر این متغیر بر خروجی‌های فرایند، تغییرات چندانی در مقدار آن‌ها ملاحظه نشده است.

کلیدواژگان

شکل‌دهی ورق‌های فولادی
فرایند گرمایش خطی
گرمایش القایی

Experimental evaluation of deflection and angular distortion of st37 steel plates after induction line heating

Seyed Jalal Hemmati*, Hamed Abbasi Nezhad

Mechanical Engineering Department, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

* P.O.B. 3995, Bandar Abbas, Iran, hemmati@hormozgan.ac.ir

Keywords

Steel plate forming
Line heating process
Induction heating

Abstract

One of the methods for shaping double-curved metallic plates is the line heating process. In this process, they are gradually shaped by heating the plates in the direction of predetermined lines. In the past, mainly gas torches have been used as heating sources. Since the heat flux of the source should be controlled for accurate control of plate deformation during the process and this is not easy with the torch, one of the suitable alternatives is the induction coil as a heating source. In this research, an experimental evaluation of the linear heating induction process of steel plates has been dealt with and studied. Considering the cost of the experimental tests, they were designed by Taguchi method after selecting the effective variables. Thickness of the plate, intensity of the current passed through the coil and velocity of the coil were the studied variables. Deflection and angular distortion of the plate are also considered as the process outputs. Among these variables, thickness of the plate has the greatest impact on the deflection and angular distortion of the plate. Intensity of the current is important in the second order. In the intended range for coil velocity, no significant changes were made in their amount while confirming the impact of this variable on process outputs.

1- مقدمه

بر اساس شکل 1، در این فرایند منبع حرارت مناسب با سرعت ثابت در راستای خطوط مشخص، حرکت داده می‌شود و پس از فرایند در امتداد هر خط و عمود بر آن مقداری تغییر شکل اعوجاجی و انقباضی در ورق ایجاد می‌گردد به طوری که ورق به تدریج شکل خواهد گرفت. گرمایش ورق تا جایی ادامه خواهد یافت که شکل آن بر شکل نهایی ورق مورد نظر منطبق گردد.

در حالی که ورق‌های تک انحنای به سادگی به وسیله نورد قابل تولید هستند برای شکل‌دهی ورق‌های با انحنای دوبل مانند بعضی از ورق‌های بدنه کشتی و درب مخازن خاص که بزرگ و سنگین هستند نمی‌توان فقط با نورد، آن‌ها را شکل داد. از طرف دیگر به دلیل تعداد محدود آن‌ها ساخت قالب اقتصادی نیست. در مقابل، فرایند گرمایش خطی با ابزار ساده و هزینه کمتر قابل اجراست.

Please cite this article using:

S. J. Hemmati, H. Abbasi Nezhad, Experimental evaluation of deflection and angular distortion of st37 steel plates after induction line heating, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 5, No. 1, pp. 37-44, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

پیشینه‌ای از تحقیق نیز در داخل کشور یافت نشد. لذا تحقیق فعلی در راستای بررسی بیشتر در زمینه گرمایش خطی القایی در ورق‌های فولادی انجام گرفته است که می‌تواند ضمن درک بهتر نحوه تأثیر متغیرها، از نتایج آن برای شبیه‌سازی فرایند استفاده شود.

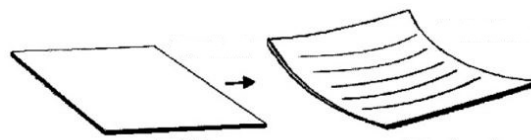


Fig. 1 Schematic of initial plate and final plate with its heating lines
شکل 1 شماتیک ورق اولیه و ورق نهایی به همراه خطوط گرمایش آن

2- پدیده گرمایش القایی

مطابق شکل 2، هرگاه یک ماده رسانا (ورق فولادی) در حوضه میدان مغناطیسی یک رسانای حامل جریان (سیم با مقطع مربعی) قرار بگیرد براساس قانون فارادی، جریانی مساوی و مختلف‌الجهت با جریان اصلی در آن القا می‌شود. چاله سایه خورده در این شکل، میدان جریان القا شده را نشان می‌دهد. «اثر مجاورت²» باعث می‌شود چگالی جریان به سمت سطوح مجاور القاگر و ورق متمایل شود. در این حالت چگالی جریان در چاله نیز همچون القاگر به سمت سطح مجاور رسانا پیشینه است و به سمت مغز ورق کم می‌شود. حضور جریان در چاله زیر کویل موجب گرمایش ژولی قطعه (RI^2) می‌شود. به عمقی که جریان القایی به حدود 37% جریان پیشینه می‌رسد عمق نفوذ جریان می‌گویند. هرچه فرکانس جریان بیشتر شود عمق نفوذ کمتر می‌شود [9] و نقش گرمایش ژولی از حالت یک منبع حجمی به سمت منبع سطحی حرارت پیش می‌رود.

لازم به ذکر است که با حرکت کویل تحت سرعت ثابت، میدان الکترومغناطیسی و شرایط مرزی الکترومغناطیسی-حرارتی تغییر می‌کند. همچنین با افزایش درجه حرارت ماده، خواص مغناطیسی و حرارتی آن تغییر می‌کنند. به عنوان مثال با افزایش درجه حرارت، رسانایی الکتریکی کم می‌شود و در یک درجه حرارت خاص، معروف به «نقطه کوری³»، ماده غیر مغناطیس می‌شود.

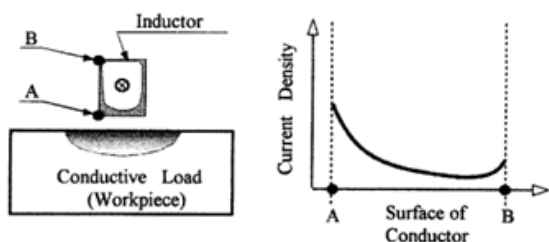


Fig. 2 Current induction phenomena and intensity distribution in workpiece [9]

شکل 2 پدیده القای جریان و توزیع چگالی جریان در قطعه کار [9]

3- متغیرهای مؤثر بر فرایند

در فرایند گرمایش خطی القایی می‌توان متغیرهای مؤثر را در

در فرایند گرمایش خطی¹ از منابع حرارت مختلفی می‌توان استفاده کرد که قدیمی‌ترین نوع آن مشعل گازی است. اما گرمایش مشعلی محدودیت‌هایی دارد؛ عدم یکنواختی در فرایند گرمایش، جذب انرژی کم، ایجاد آلودگی‌های محیطی، ایجاد سر و صدا و امکان اتوماسیون پایین فرایند، از جمله محدودیت‌های بکارگیری این نوع منبع حرارتی است. در سال‌های اخیر از گرمایش القایی نیز استفاده شده است. کنترل بالا بر انرژی و راندمان بالای الکتریکی، تمیزی و تکرارپذیری فرایند، قابلیت اتوماسیون و کنترل رایانه‌ای از مزایای این نوع گرمایش به حساب می‌آید.

پژوهش در زمینه گرمایش خطی القایی عمدتاً از سال دو هزار میلادی به بعد انجام گرفته است. در برخی گزارش‌ها، توزیع درجه حرارت دوبعدی در طول گرمایش القایی فرکانس بالا بررسی شده است [۱۰،۲]. بعضی از محققان [۳،۴] برای مدل‌سازی شار حرارت ایجاد شده به وسیله گرمایش خطی با استفاده از القاگر فرکانس بالا، مدل‌های محاسباتی ارائه کرده‌اند. لووهمکارانش [5] به تحلیل المان محدود گرمایش القایی فرکانس بالا پرداخته‌اند. در این گزارش از القاگر حلقوی به عنوان منبع حرارت استفاده شده است. برای اعتبارسنجی، مطالعات تجربی نیز انجام داده‌اند. بائه و همکارانش [6] به مطالعه عددی و تجربی فرایند پرداخته‌اند. ایشان ادعا کرده‌اند در تحقیقات قبلی کویلینگ میدان‌های الکترومغناطیسی و حرارت لحاظ نگردیده است.

ژانگ و همکاران [7] به گرمایش القایی استاتیک اشاره کرده‌اند. منظور ایشان استفاده از یک القاگر به طول خط گرمایش و ساکن در بالای آن بوده است. ساکن بودن کویل، تحلیل را ساده می‌کند ولی در عمل به خاطر انحنای ورق و عدم امکان تأمین فاصله هوایی ثابت بین آن با کویل، عملیاتی نیست به طوری که ایشان در گزارش بعدی خود [8] با استفاده از کویلی به طول کمتر و به صورت متحرک در طول خط گرمایش به شبیه‌سازی فرایند پرداخته‌اند.

در مراجع پیش‌گفته غالباً اطلاعات مربوط به شکل و هندسه کویل، شرایط مرزی و یا خواص مواد کامل ذکر نشده‌اند و نتایج، وابسته به شرایط تحلیل و غیر عمومی هستند. از طرفی

² Proximity effect

³ Curie point

¹ Line heating

3 نشان داده شده است. این کویل مسطح روبشی از حدوداً 1/5 حلقه مسی به قطر 6 میلی‌متر ساخته شده است و برای القا روی ورق تخت با پرس کاری قدری مقطع آن از حالت دایره‌ای به شکل مستطیلی در آورده شده است. البته همان طور که از شکل کویل مشاهده می‌شود موقع خم کاری، قدری از حالت دایره‌ای عدول نموده است. در طول گرمایش توسط جریان آب داخل کویل خنک کاری می‌شود به طوری که سطح آن کاملاً خنک است.

3-3- شرایط گرمایش

از جمله متغیرهای حائز اهمیت در گروه شرایط گرمایش عبارتند از: فاصله کویل تا ورق، شدت و فرکانس جریان عبوری از کویل، توان دستگاه و سرعت حرکت کویل روی سطح ورق. برای ساده‌سازی، فاصله کویل تا ورق و همچنین فرکانس جریان ثابت و به ترتیب برابر 5 mm و 10 KHz در نظر گرفته شده‌اند. میزان نزدیکی نقاط شروع و خاتمه حرکت کویل نسبت به لبه‌های ورق نیز به دلیل دخالت اثرات انتها و لبه‌ای بر رژیم تغییر شکل ورق تأثیرگذارند. به این خاطر برای اجتناب از این اثرات از گرمایش ده درصد طول گرمایش از ابتدا و انتهای مسیر حرکت آن چشم پوشی شده است. شرایط تکیه‌گاهی ورق حین گرمایش نیز از نوع آزاد روی سطح صاف است.

جدول 1 ترکیب شیمیایی فولاد st37 [6] (درصد وزنی)

Table 1 Chemical composition of st37 steel[6] (weight%)				
Fe	C	Mn	Si	P
Base	0/13	0/57	0/2	0/01
S	Cr	Mo	Ni	Co
0/01	0/002	0/01	0/03	0/001



Fig. 3 A view of the coil used in experimental tests

شکل 3 نمایی از کویل مورد استفاده در آزمون‌های تجربی

بر اساس تعریف حرارت مخصوص، توان لازم (P_w) برای گرم کردن قطعه کار برای افزایش درجه حرارت متوسط معین را می‌توان به صورت رابطه (1) تخمین زد [9]:

$$P_w = mc \frac{T_f - T_{in}}{t} \quad (1)$$

در این رابطه m جرم قطعه کار (kg)، c مقدار متوسط حرارت

قالب شرایط قطعه کار، شرایط کویل و شرایط فرایند تقسیم‌بندی نمود. منظور از شرایط قطعه کار، جنس و ابعاد آن می‌باشد. هندسه، شکل و جنس کویل جزو شرایط کویل در نظر گرفته می‌شوند و توان و فرکانس جریان، فاصله کویل تا ورق، سرعت حرکت کویل طول و موقعیت خط گرمایش جزو شرایط فرایند هستند. در این مقاله با توجه به ثابت فرض کردن طول و عرض ورق و جنس آن و شرایط کویل، سه متغیر سرعت کویل، شدت جریان و ضخامت ورق از جمله متغیرهایی هستند که مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

3-1- شرایط قطعه کار

ورق‌هایی را می‌توان به این روش شکل داد که رسانای جریان بوده و در اثر گرمایش و خنک‌کاری سریع، خاصیت سخت شوندگی نداشته باشند. سخت شوندگی موضعی در راستای خط گرمایش به دلیل درصد کربن می‌تواند باعث ایجاد تنش‌های پسماند و خوردگی و شکنندگی موضعی شود. در این تحقیق عمدتاً شکل‌دهی ورق‌های فولادی بدنه شناورها مد نظر است. در کشتی‌سازی‌ها معمولاً ورق‌های فولادی با انحنای دوپل را به این روش به شکل نهایی در می‌آورند و در مرحله اول انحنای لازم در یک راستا را با فرایندهایی مانند نورد و یا پرس کاری ایجاد می‌کنند. به این ترتیب در شرایط کارگاهی با ورق‌های خمیده سر و کار دارند. با توجه به کاربرد فولاد st37 در صنایع کشتی‌سازی، این ماده برای مطالعه انتخاب شده است. ترکیب شیمیایی این فولاد در جدول 1 ذکر شده است. ماده همگن و همسانگرد فرض شده است. برای اطمینان از تخت بودن سطح اولیه ورق‌ها، با فرزکاری پیشانی تراشی، قبل از گرمایش خطی تحت ماشین‌کاری قرار گرفته‌اند. ابعاد ورق به خصوص ضخامت آن به همراه جنس قطعه در میزان شکل‌دهی تأثیرگذارند. طول و عرض ورق‌ها 500×500 mm در نظر گرفته شده‌اند و به وسیله هوا برش، برش خورده‌اند. سه ضخامت معمول در یاردها برای این نمونه‌ها برابر 10، 15 و 20 میلی‌متر انتخاب شده است.

3-2- شرایط کویل

شکل و ابعاد کویل گرمایش و تعداد حلقه‌های آن بر میزان حرارت ورودی به ورق و در نتیجه میزان تغییر شکل آن مؤثرند. خنک‌کاری کویل، از طریق عبور آب از داخل آن انجام می‌گیرد. میزان این خنک‌کاری می‌تواند با ثابت نگاه‌داشتن خواص الکترومغناطیسی ماده کویل مؤثر باشد. به همین ترتیب جنس کویل نیز مهم است. کویل مورد استفاده در این مطالعه در شکل

جدول 2 داده‌های مربوط به تخمین توان لازم برای گرمایش [9]

Table 2 The data required to estimate heating power

75%	راندمان کل گرمایش
$7800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	چگالی فولاد در 800°C
$887 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$	حرارت مخصوص در 800°C
490 r^2	جرم استوانه تحت تأثیر گرمایش کویل به شعاع r (m)

جدول 3 متغیرهای مورد مطالعه در این تحقیق و سطوح تغییرات هر یک

Table 3 The studied parameters and their level of variations

متغیر	شدت جریان	ضخامت ورق	سرعت کویل	سطح
(A)	(mm)	(mm/sec)		
50	10	5	اول	
100	15	10	دوم	
150	20	15	سوم	

جدول 4 آزمون‌های نه گانه طراحی شده و مقادیر متغیرهای مختلف

Table 4 Nine designed tests and values of the different parameters

متغیر	شدت جریان	ضخامت ورق	سرعت کویل	آزمون
(A)	(mm)	(mm/sec)		
50	10	5	اول	
50	15	10	دوم	
50	20	15	سوم	
150	10	10	چهارم	
150	15	15	پنجم	
150	20	5	ششم	
100	10	15	هفتم	
100	15	5	هشتم	
100	20	10	نهم	

5- تنظیمات روش تجربی

بر اساس محاسبات تخمینی اولیه، از یک دستگاه گرمایش القایی فرکانس بالا ساخت کشور چین و شرکت Chengdu Duolin Electronic مدل SSF80 استفاده شده است. توان این دستگاه 80KW بوده و فرکانس آن در محدوده 10-30 KHz قابل تنظیم است. این دستگاه قادر است شدت جریان‌های مختلف را پشتیبانی کند به طوری که می‌توان شدت جریان‌های 50، 100 و 150 A را روی آن تنظیم کرد. برای ایجاد حرکت با سرعت ثابت، میز روی یک بستر متحرک قرار گرفته است که با مکانیزم چرخ و زنجیر و با سرعت‌های مختلف به حرکت در می‌آید. شکل‌های 4 و 5 نمونه‌ای از ورق‌های تحت گرمایش با سرعت ثابت را حین گرم‌کاری نشان می‌دهند. موقع انجام آزمون‌ها دقت شده است که با اندازه‌گیری درجه حرارت بیشینه در خط گرمایش، ترکیب سرعت و شدت جریان به گونه‌ای باشد که دمای بیشینه از حدوداً 800°C تجاوز نکند. این دما تقریباً دمای تبلور مجدد و نقطه کوری فولاد است.

ویژه T_f و T_{in} ($\text{J}/\text{kg}^\circ\text{C}$) به ترتیب درجه حرارت‌های اولیه و نهایی ($^\circ\text{C}$) و مدت زمان گرمایش مورد نیاز (sec) می‌باشند. لازم به ذکر است که توان القا شده در قطعه کار حین گرمایش ثابت نیست و بسته به تغییر مقاومت ویژه الکتریکی و نفوذپذیری نسبی تغییر می‌کند. به همین دلیل به جای P_w از P_w^{av} یا توان متوسط استفاده می‌شود. بازده کل کویل القایی (η) ترکیبی از بازده الکتریکی و بازده حرارتی است [9] یعنی:

$$\eta = \eta_{el}\eta_{th} \quad (2)$$

در این رابطه η_{el} بازده الکتریکی و η_{th} بازده حرارتی است. بازده الکتریکی تابعی از افت‌های الکتریکی از جمله افت توان در حلقه‌های کویل و افت در اجسام رسانای واقع در اطراف قطعه کار است. بازده حرارتی نیز نشان دهنده میزان افت‌های حرارتی در مقایسه با توان گرمایش بوده و تابعی از افت ناشی از تابش و همرفت و هدایت حرارت (با اجسام دیگر در تماس با قطعه کار) است. مقدار بازده کل کویل بین صفر تا یک خواهد بود. هرگاه فرض شود کویل ساکن است و قرار باشد با نرخ گرمایش بالا ورق مجاورش را گرم کند با استفاده از مقادیر جدول 2 و ساده سازی می‌توان تخمینی از توان لازم برای گرمایش ورق به شرح رابطه (3) به دست آورد:

$$P_w = 14.5r^2 \quad (3)$$

که در آن r شعاع استوانه متأثر از گرمایش کویل بر حسب میلی‌متر و P_w ، توان القا شده بر حسب کیلو وات می‌باشند. همچنین نرخ گرمایش، $25^\circ\text{C}/\text{sec}$ تا رسیدن به دمای 800°C فرض شده است. به عنوان مثال برای گرمایش دایره‌ای به شعاع 25 میلی‌متر به حدوداً 10 KW توان نیاز خواهد بود. با در نظر گرفتن سرعت حرکت کویل و راندمان الکتریکی 75%، توان متوسط لازم برای گرمایش تقریباً $13/5$ کیلو وات برآورد می‌شود.

4- طراحی آزمون‌های تجربی به روش ناگویی

برای مطالعه تأثیر متغیرهای سه‌گانه شدت جریان، ضخامت ورق و سرعت کویل، سطوح تغییراتی به شرح جدول 3 در نظر گرفته شد. ملاک انتخاب این سطوح گزارش محققان قبلی و یا مقدرات ساخت‌افزایی مؤلفان بوده است. بر اساس تعداد متغیرها و سطوح تغییرات هر یک در نرم‌افزار مینی‌تب با انتخاب آرایه L9 آزمون‌های تجربی نه گانه طراحی شدند. در جدول 4 ترکیب مقادیر هر یک از این آزمون‌ها ذکر شده است. در این آزمون‌ها خیز ورق و اعوجاج زاویه‌ای آن به عنوان متغیرهای خروجی مد نظر هستند.

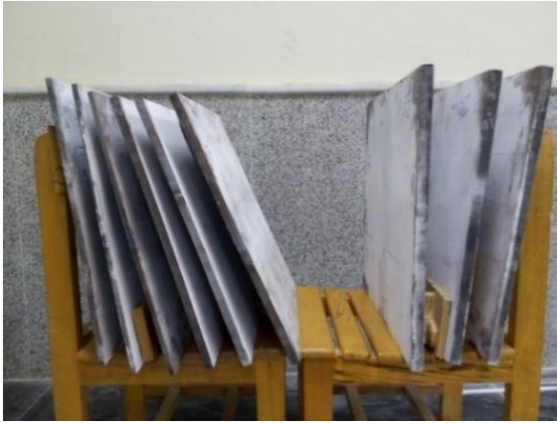


Fig. 6 Samples of experimental tests

شکل 6 نمونه‌های مورد آزمایش

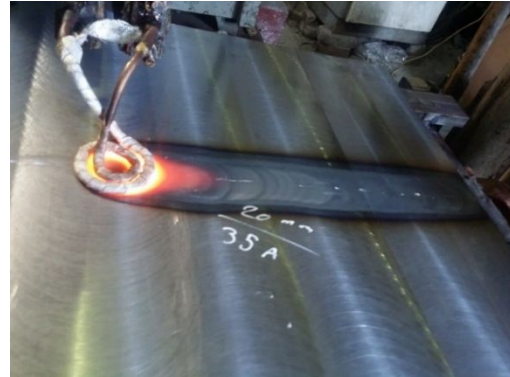


Fig. 4 One of plates during induction heating with constant velocity

شکل 4 یکی از ورق‌ها در حین گرمایش القایی با سرعت ثابت



Fig. 7 One of bent samples during 3D scanning

شکل 7 یکی از نمونه‌های خم‌کاری شده در حین اسکن سه بعدی

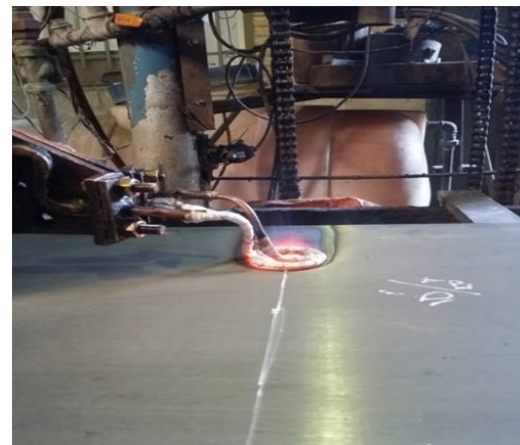


Fig. 5 Plate movement on machine table during heating

شکل 5 حرکت ورق روی میز دستگاه حین گرمایش

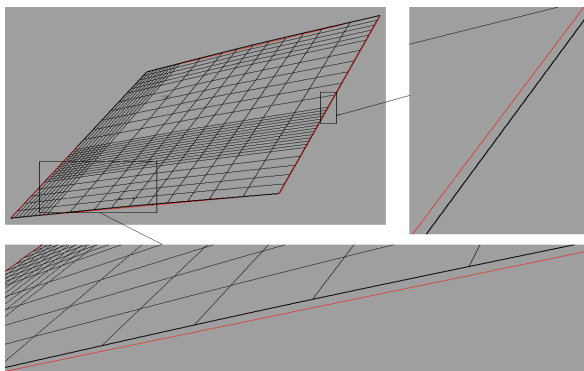


Fig. 8 A typical fitted surface on scanned points. In magnified views, thin and straight lines have been drawn to recognize the curvature of the surface edges

شکل 8 نمونه‌ای از سطوح برازنده نقاط اسکن شده. در نماهای بزرگنمایی شده خطوط کمرنگ‌تر و مستقیم، برای تشخیص انحنای لبه‌های سطح رسم شده‌اند

6- نتایج و بحث

سطح به دست آمده حالت زین اسبی دارد. متغیرهای خروجی مد نظر مقدار بیشینه خیز ورق و میانگین زاویه خطوط مماس بر

قبل از آزمون‌های اصلی با چند بار آزمایش این ترکیب‌ها تعیین شدند. شکل 6، نه ورق فولادی مورد آزمون را با ضخامت‌های سه گانه 10، 15 و 20 میلی‌متر نشان می‌دهد. برای اندازه‌گیری میزان تغییرشکل ورق، سطح گرم شده آن تحت اسکن سه بعدی قرار گرفته است. قبل از آزمایش سطوح رویی و پشتی ورق‌ها فرزکاری شده‌اند تا از یکنواختی ضخامت و تختی آن‌ها اطمینان حاصل شود. پس از گرمایش، هر نه ورق تحت اسکن قرار گرفتند که در شکل 7 نحوه اسکن سه بعدی آن‌ها با دستگاه COMET5 ملاحظه می‌شود. قبل از اسکن، سطح این نمونه‌ها توسط اسپری آماده‌سازی، روکش شده تا عملیات اسکن آن‌ها میسر شود. حاصل اسکن سطوح با فرمت STL به نرم‌افزار CAD منتقل می‌گردد و تحت برازش سطح قرار می‌گیرد. نمونه‌ای از سطوح CAD به دست آمده در جریان این آزمون‌ها پس از اسکن سه بعدی و برازش سطح سه بعدی در شکل 8 ملاحظه می‌شود.

در شکل 9 با افزایش جریان عبوری از کوپل بر میزان خیز ورق افزوده شده است. علت این امر افزایش ابعاد و عمق چاله حرارتی است که باعث تغییر شکل پلاستیک بیشتر ورق می‌گردد. همان طور که انتظار می‌رود این امر باعث کاهش زاویه اعوجاجی و یا انحنای ورق خواهد گردید (شکل 10). در این محدوده از جریان تغییرات چندانی در مورد خیز و زاویه در راستای موازی با خط گرمایش رخ نمی‌دهد (شکل‌های 11 و 12).

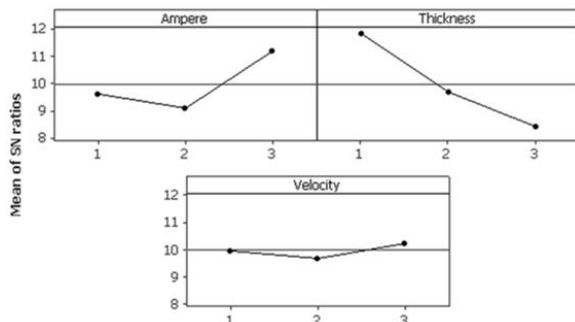


Fig. 9 Signal to noise diagrams of deflection in perpendicular direction of heating line

شکل 9 نمودارهای نسبت سیگنال به نویز عمود بر خط گرمایش

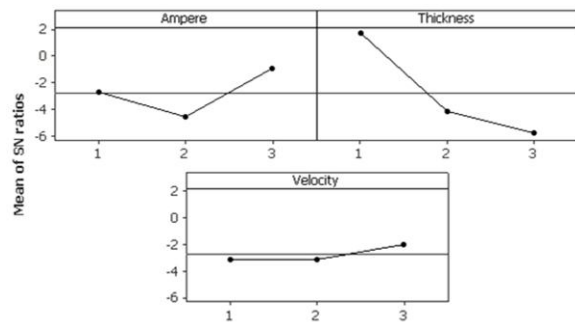


Fig. 10 Signal to noise diagrams of angular distortion in perpendicular direction of heating line

شکل 10 نمودارهای نسبت سیگنال به نویز اعوجاج زاویه‌ای عمود بر خط گرمایش

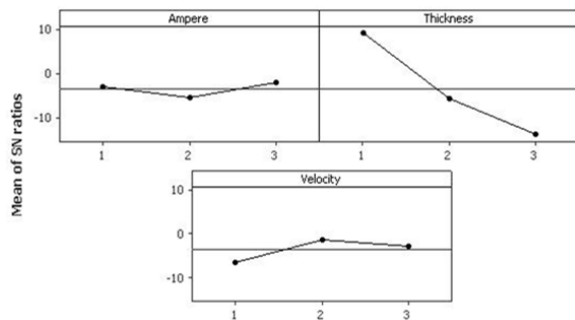


Fig. 11 Signal to noise diagrams of deflection in direction of heating line

شکل 11 نمودارهای نسبت سیگنال به نویز خیز در راستای خط گرمایش

منحنی مقطعی در وسط سطح و در دو انتهای مقطع می‌باشد. در جدول 5 نتایج بدست آمده برای هر یک از متغیرهای خروجی فرایند در وسط خط گرمایش در جهت عمود بر خط گرمایش و نیز موازی با آن ذکر شده است. از شکل 8 و مقادیر جدول 5 مشاهده می‌شود که خیز و انحنای ورق گرم کاری شده در راستای عمود بر خط گرمایش به مراتب از راستای موازی با آن بیشتر است. در اکثر تحقیقات قبلی برای ساده‌سازی از اعوجاج زاویه‌ای در راستای موازی صرف‌نظر شده است. در شکل‌های 9 تا 12 نمودارهای سیگنال به نویز خروجی نرم‌افزار مینی‌تب برای داده‌های تجربی به دست آمده بر حسب مقادیر ورودی و خروجی هر آزمون رسم شده است.

با افزایش ضخامت از خیز در راستای عمود بر و موازی با خط گرمایش کاسته شده است. یعنی با افزایش ضخامت و در نتیجه افزایش گرادیان درجه حرارت به دلیل افزایش موضعی تغییر شکل، خیز کاهش یافته است. البته مقدار این تأثیر در خصوص منحنی موازی با خط گرمایش کمتر است (شکل‌های 9 و 11). همچنین بر اساس شکل‌های 10 و 12 با افزایش ضخامت بر انحنای مقطع ورق در هر دو راستا افزوده می‌شود.

جدول 5 نتایج آزمون‌های تجربی

Table 5 The results of the experimental tests

متغیر	عمود بر خط گرمایش	مقادیر خروجی	موازی با خط گرمایش	مقادیر خروجی
آزمون اول	خیز	3/28	خیز	2/19
	زاویه	1/12	زاویه	0/89
آزمون دوم	خیز	2/29	خیز	0/56
	زاویه	0/53	زاویه	0/27
آزمون سوم	خیز	2/73	خیز	0/29
	زاویه	0/50	زاویه	0/14
آزمون چهارم	خیز	2/53	خیز	3/64
	زاویه	0/76	زاویه	1/71
آزمون پنجم	خیز	2/86	خیز	0/44
	زاویه	0/65	زاویه	0/21
آزمون ششم	خیز	1/97	خیز	0/10
	زاویه	0/47	زاویه	0/13
آزمون هفتم	خیز	4/10	خیز	3/10
	زاویه	1/54	زاویه	1/44
آزمون هشتم	خیز	2/80	خیز	0/55
	زاویه	0.70	زاویه	0/27
آزمون نهم	خیز	3.11	خیز	0/30
	زاویه	0.71	زاویه	0/11

خیز بر حسب mm و زاویه بر حسب درجه هستند

بر خط گرمایش از روی مدل سطحی برازش شده روی ابر نقاط استخراج شدند. از نتایج تجربی می‌توان استنباط کرد علی‌رغم گزارش‌ها و ساده‌سازی‌های محققان قبلی که غالباً از تغییر شکل در راستای موازی با خط صرف‌نظر شده است نتایج اسکن سه‌بعدی مؤید خیز و اعوجاج زاویه‌ای است که در حالت خاص تکیه‌گاهی این مطالعه حالت زین اسبی به سطح نهایی داده است. به نظر می‌رسد در صورت اعمال شرایط تکیه‌گاهی ساده در چهار گوشه، حاصل فرایند یک سطح بالشی¹ خواهد بود. انحنای منحنی‌ها به خصوص در راستای عمود بر خط گرمایش، نشانگر این واقعیت است که ورق تنها در اطراف منطقه متأثر از حرارت انحنادار نیست بلکه در طول مقاطع دور از خط نیز انحنادار است. از بین متغیرهای منتخب، ضخامت ورق بیشترین تأثیر را بر میزان خیز و اعوجاج زاویه‌ای ورق دارد. شدت جریان در مرتبه دوم اهمیت است. در بازه² در نظر گرفته شده برای سرعت کویل، ضمن تأیید تأثیر این متغیر بر خروجی‌های فرایند، تغییرات چندانی در مقدار آن‌ها ملاحظه نشده است.

8- مراجع

- [1] H. Kawaguchi, H. Enokizono, T. Todaka, Thermal and magnetic field analysis of induction heating problem, *Materials Processing Technology*, Vol. 161, pp. 193–198, 2005.
- [2] V. Cingoski, A. Namera, K. Kaneda, H. Yamashita, Analysis of magneto-thermal coupled problem involving moving eddy-current conduction, *IEEE Transactions of Magnetics*, Vol. 32, No. 3, pp. 1042–1045, 1996.
- [3] H. Shen, Z. Q. Yao, Y. J. Shi, J. Hu, Study on temperature field induced in high frequency induction heating, *Acta Metallurgica Sinica*, Vol. 19, pp. 190–196, 2006.
- [4] E. W. Reutzl, L. Zhang, P. Michaleris, A differential geometry approach to analysis of thermal forming, *Mechanical Sciences*, Vol. 48, Issue 10, pp. 1046–1062, 2006.
- [5] Y. Luo, M. Ishiyama, H. Murakawa, Study of temperature field and inherent strain produced by high frequency induction heating on flat plate, *Transactions of JWRI*, Vol. 33, No. 1, pp. 59–63, 2004.
- [6] K. Y. Bae, Y. S. Yang, C. M. Hyun, S. H. Cho, Derivation of simplified formulas to predict deformation of steel formulas to predict deformations of plate in steel forming process with induction heating, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 48, pp. 1646–1652, 2008.

¹ Pillow shape

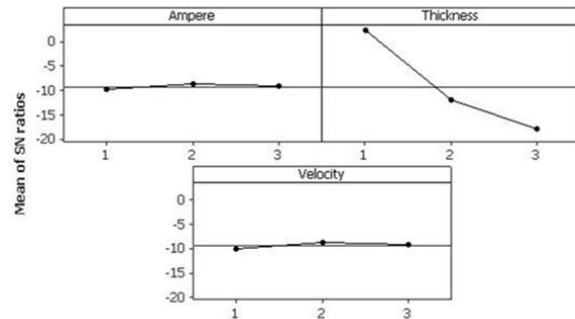


Fig. 12 Signal to noise diagrams of angular distortion in direction of heating line

شکل 12 نمودارهای نسبت سیگنال به نویز اعوجاج زاویه‌ای در راستای خط گرمایش

از شکل‌های 9 و 10 ملاحظه می‌شود در راستای عمود بر خط گرمایش تأثیر تغییرات سرعت بر مقدار خیز بیش از تأثیر آن بر اعوجاج زاویه‌ای بوده است. این مسأله تا حدودی برای راستای دیگر هم صادق است. لیکن با مراجعه به شکل‌ها ملاحظه می‌شود در کل در بازه 50 تا 150 میلی‌متر بر ثانیه تغییرات معنی داری در میزان متغیرهای خروجی رخ نداده است.

7- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

تحقیقات در زمینه فرایند گرمایش خطی و یا خمکاری مشعلی در داخل و خارج کشور، قدمت زیادی دارد. همچنین کاربرد لیزر برای شکل‌دهی ورق نیز مورد توجه محققان داخلی و خارجی قرار گرفته است؛ اما استفاده از گرمایش القایی و کویل فرکانس بالا به عنوان منبع حرارت که عمدتاً از سال 2000 به بعد مورد مطالعه خارجی قرار گرفته است در داخل کشور، مورد توجه نبوده است. با توجه به مزایای گرمایش القایی نسبت به گرمایش مشعلی و لیزری، اقتضا می‌نمود مطالعاتی در این زمینه انجام بگیرد. نتایج تجربی گزارش شده می‌تواند برای شبیه‌سازی‌های تحلیلی و درک بهتر فرایند مؤثر باشند.

در این مقاله شکل‌دهی ورق‌های فولادی با گرمایش خطی القایی مورد مطالعه قرار گرفت. دینامیک این فرایند پیچیدگی‌های خاص خود را دارد و متغیرهای متعددی بر آن تأثیر می‌گذارند. در این مطالعه جنس ورق، هندسه، ابعاد و فاصله کویل تا سطح ورق و همچنین فرکانس جریان عبوری از آن ثابت در نظر گرفته شده‌اند. به این ترتیب با هدف بررسی نحوه تأثیر شدت جریان، ضخامت ورق و سرعت کویل، آزمون‌هایی به روش تاگوچی طراحی و ترتیب داده شدند. پس از گرمایش خط وسط نمونه‌ها و خنک کاری سطح حاصل، توسط اسکنر سه بعدی تحت اسکن قرار گرفتند و میزان خیز و اعوجاج زاویه‌ای ورق‌ها در راستای عمود

- heating applied to steel plate bending, *Ship Production and Design*, Vol. 27, No. 3, pp. 99-110, 2011.
- [9] V. Rudnev, D. Loveless, R. Cook, *Handbook of Induction Heating*, pp. 120-143, Marcel Dekker, New York, 2003.
- [7] X. B. Zhang, Y. J. Liu, X. F. Hu, Z. S. Ji, Experimental analysis and numerical simulation of induction heat forming of steel plate, *Harbin Engineering university*, Vol. 30, No. 3, pp. 239-243, 2009.
- [8] X. B. Zhang, Y. J. Liu, Y. L. Yang, Technical parameter analysis of high frequency induction