مجله مهندسی مکانیک مدرس، آذر 1394، دوره 15، شماره 9، ص‌ص 153-160

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

مدل‌سازی و بهینه‌سازی دوهدفه در فرآیند لایه‌نشانی دومرحله‌ای تحت قید حداکثر حرارت مجاز

ایرج لیرابی[1]، حسین امیرآبادی[2*]

1- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

*بیرجند، صندوق پستی 97175/615 ، hamirabadi@birjand.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 18 اردیبهشت 1394

پذیرش: 13 تیر 1394

ارائه در سایت: 24 مرداد 1394

کلید واژگان:

لایه‌نشانی دومرحله‌ای

مدل‌سازی مهره جوش

ماشینکاری

بهینه‌سازی فرآیند

قید حرارتی

چکیده

روش لایه‌نشانی دومرحله‌ای زیرشاخه‌ای از شیوه‌های ساخت سریع می‌باشد که در آن لایه‌ای از فلز مذاب بر روی زیرلایه نشانده شده و با انباشته شدن لایه‌ها بر روی هم هندسه‌ی قطعه کامل می‌شود. نرخ رسوب بالا، ارزان بودن و دامنه‌ی کاربرد وسیع از خصوصیات این روش می‌باشد. جوشکاری و فرزکاری کف‌تراشی دو گام پیاده‌سازی روش لایه‌نشانی دومرحله‌ای می‌باشند. در مرحله‌ی جوشکاری، فلز توسط خطوط جوش بر روی سطح نشانده می‌شود و در مرحله‌ی فرزکاری، لایه‌ی ساخته شده برای دستیابی به سطحی تخت و یکپارچه رویه‌برداری می‌شود. در این مقاله بهینه‌سازی فرآیند لایه‌نشانی دومرحله‌ای برای دستیابی به دو هدف متناقض و ناهمساز مورد توجه قرار گرفته است. این دو هدف متناقض عبارت از کاهش حجم ماشینکاری و افزایش مساحت مهره‌ی جوش می‌باشند. بدین منظور، نخست مدل‌سازی هندسی مهره‌ی جوش با توجه به اثر هم‌پوشانی خطوط جوش متوالی صورت پذیرفته است. سپس شرایط دستیابی به لایه‌ی شبه-تخت در مرحله‌ی جوشکاری بررسی شده و مدل مهره‌جوش برای کاهش حجم براده‌برداری تعمیم یافته است. سپس بهینه‌سازی مدل توسط الگوریتم ژنتیک با اعمال قیدهای فرآیندی و حرارتی صورت پذیرفته و نتایج بدست آمده با نتایج تجربی مقایسه گردیده است. در این مقاله با تعریف قید حرارتی، معیاری جدید برای یافتن پاسخ بهینه‌ی مدل دوهدفه ارائه شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد برای سیم‌جوش ER70S6 با قطر 0/8میلیمتر، پارامترهای بهینه عبارت از سرعت تغذیه‌ی 8/6 m/min و سرعت پیشروی 0/6 m/min می‌باشند که بدون نقض قید حرارتی، نرخ رسوب 4224 mm³/min را ممکن می‌سازند.

Multi-objective Modeling and Optimization of Hybrid Layered Manufacturing under Maximum Allowable Heat Constraint

Iraj Lirabi[1], Hossein Amirabadi[2*]

1- Department of Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran
2- Department of Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran
*P.O.B. 97175/615 Birjand, Iran, hamirabadi@birjand.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 08 May 2015
Accepted 04 July 2015
Available Online 15 August 2015

Keywords:
Hybrid Layered Manufacturing
Weld Bead Modeling
Machining
Optimization
Heat Constraint

ABSTRACT

Hybrid layered manufacturing is one of the key methods among rapid manufacturing techniques in which a layer of molten metal is deposited on the substrate and desired geometry is completed by stacking the layers. Low cost, high rates of deposition and great applicability are some of the characteristics of hybrid layered manufacturing. Welding and face milling are the two steps of the process. In welding phase, metal is built up by weld lines to cover a given surface and in milling phase weld beads are truncated to achieve a flat and integrated layer. The focus in this article is to optimize two contradictory objectives, namely reduction in machining volume and increase in deposition rate. Thus, the first task is to formulate the bead model considering the metal build-up effect. Then, the situation needed for achieving quasi-flat layers in welding phase is studied and the unified model is extracted. Moreover, GA is used to find optimum values for the proposed model based on heat and process constraints. Finally the model is verified and conclusions are drawn. This article presents a new criterion by defining the heat constraint for the multi-objective function. Results show that for the 0.8 mm wire ER70S6, optimum values are 8.6 m/min for wire speed and 0.6 m/min for torch speed that yield a deposition rate of 4224 mm³/min without violating heat constraint.

1- مقدمه

لایه‌نشانی دو مرحله‌ای[1] از جمله فرآیندهای ساخت سریع می‌باشد که قطعات فلزی را با ترکیب فرآیندهای افزایشی و کاهشی ایجاد می‌نماید[1]. در این روش معمولاً از فرآیندهای جوش برای مرحله‌ی افزایشی استفاده می‌شود و طی آن هندسه‌ی تقریبی هر لایه با ساختار یک‌پارچه‌ای از فلز قابل‌دستیابی

1- Hybrid Layered Manufacturing

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

I. Lirabi, H. Amirabadi, Multi-objective Modeling and Optimization of Hybrid Layered Manufacturing under Maximum Allowable Heat Constraint, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 9, pp. 153-160, 2015 (In Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.9.11.3]

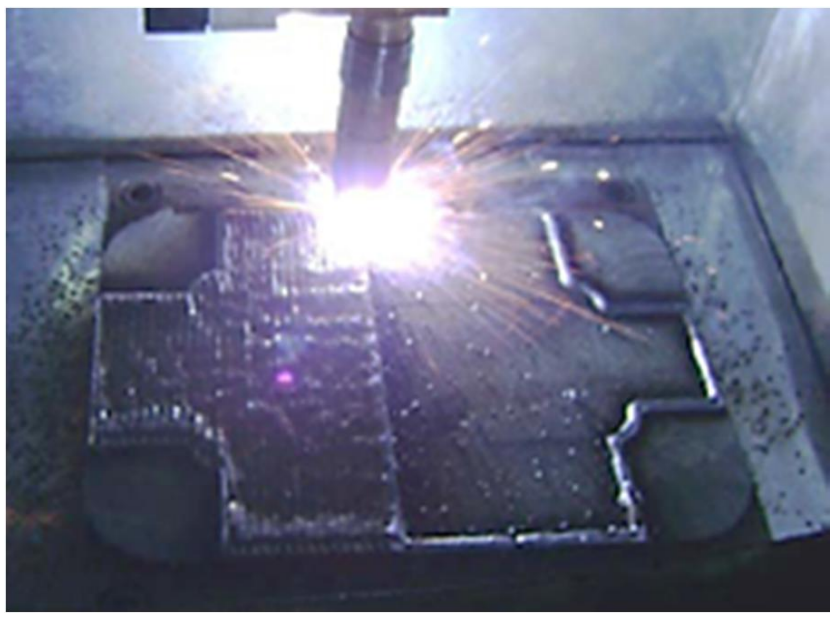
است. روش قوس الکتریکی با گاز محافظ و الکترود مصرفی[1] از پرکاربردترین روشهای جوشکاری برای لایه‌نشانی و ساخت سریع می‌باشد. نرخ رسوب گزارش شده برای جوشکاری قوس الکتریکی در حدود 50 تا 130 گرم بر دقیقه می‌باشد که با مدیریت حرارتی درست این نرخ رسوب تا 800 گرم بر دقیقه نیز امکان‌پذیر است. این میزان در مقایسه با نرخ رسوب فرآیندهای جوشکاری لیزری و پرتوی الکترونی که به ترتیب حدود 2 تا 10 گرم در هر دقیقه می‌باشند، بسیار بیشتر است [2]. در شکل 1 مرحله‌ی افزایشی فرآیند لایه‌نشانی دومرحله‌ای نشان داده شده است.

به منظور ساخت قطعات یکپارچه می‌توان از سیم‌های پر کننده‌ی هم‌جنس ولی با قطرهای متفاوت استفاده نمود. سیم‌های با قطر بزرگتر را می‌توان برای پر کردن قسمت‌های داخلی هر لایه به کاربرد و سیم‌های دارای قطر کوچکتر را برای ایجاد مرز بیرونی هر لایه استفاده نمود. همچنین می‌توان برای ساخت مواد کامپوزیتی از سیم‌های دارای جنس‌های مختلف استفاده نمود [1].

در مرحله‌ی کاهشی، مقدار ماده‌ی اضافی در هر لایه توسط عملیات ماشینکاری زدوده می‌شود و به دنبال آن هندسه‌ی دقیق هر لایه بدست می‌آید. اگر چه دو مرحله‌ی کاهشی و افزایشی تفاوت‌های آشکاری با یکدیگر دارند ولی وجه مشترک آنها در سرعت بالای اجرای هر دو مرحله می‌باشد.
از سوی دیگر، امکان تشکیل لایه‌های اکسیدی بر روی سطح جوش وجود دارد که می‌تواند منجر به وقوع عیوب جوش در ساختار قطعه‌کار گردد. به منظور برطرف نمودن این مشکلات و نشاندن لایه‌های بعدی بر روی لایه‌های پیشین از فرآیند فرزکاری کف‌تراشی برای حذف ناهمواری‌ها و قسمت‌های اکسیدی سطح جوش استفاده می‌شود.

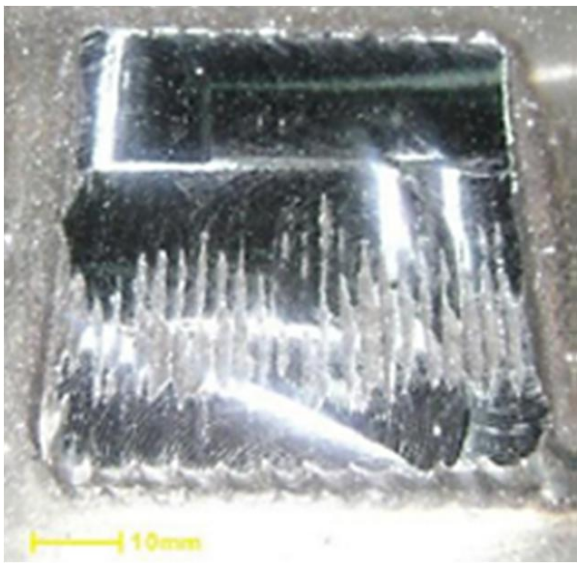
اگر چه می‌توان پس از اعمال چند لایه بر روی هم نیز مرحله‌ی فرزکاری را انجام داد، اما با وجود کاهش بازدهی غالباً هر لایه پس از جوشکاری برای رفع عیوب احتمالی و دستیابی به قطعات یکپارچه مورد ماشینکاری قرار می‌گیرد. در شکل 2، لایه‌ای در مرحله‌ی ماشینکاری نشان داده شده است. در شکل 3 نیز یک قالب تزریق پلاستیک پس از تکمیل لایه‌ها و همچنین پس از ماشینکاری نشان داده شده است.

توانایی منحصربه‌فرد روش لایه‌نشانی دومرحله‌ای برای ساخت قطعات کامپوزیتی (ساخته شده از چند نوع فلز) که دارای هندسه‌ی پیچیده‌ای هستند به خوبی به اثبات رسیده است [4]. در ادامه به بررسی هندسه‌ی جوش در فرآیند لایه‌نشانی دومرحله‌ای پرداخته شده است.



شکل1 مرحله‌ی رسوب جوش در فرآیند لایه‌نشانی دومرحله‌ای [3]

1- Gas Metal Arc Welding



شکل2 لایه‌ی نیمه‌ماشینکاری شده[4]

شکل3 ساخت قالب به همراه سیستم خنک‌کاری [5]

2-مدل‌سازی هندسی جوش

پارامترهای فرآیند جوشکاری بر روی یکدیگر تاثیر متقابل دارند. به گونه‌ای که هر گاه یک پارامتر تغییر کند، دیگر پارامترها نیز دستخوش تغییر می‌شوند تا قوس الکتریکی پایدار بماند. در یک فرآیند جوشکاری کنترل‌شده، شکل مهره‌ی جوش تنها متاثر از قطر سیم پر کننده (d_o)، سرعت تغذیه‌ی سیم (v_w)، سرعت پیشروی جوشکاری (v_t) و گام بین دو مهره‌ی جوش (P) می‌باشد. برخی از مدل‌های جوش ارائه شده جنبه‌های مختلفی همچون رابطه‌ی بین پارامترهای فرآیند جوشکاری و هندسه‌ی مهره‌ی جوش را مد نظر قرار داده‌اند. این مدل‌ها سه پارامتر هندسی مهره‌ی جوش که عبارتند از عرض جوش (w)، ارتفاع جوش (h) و عمق جوش (ناحیه‌ی نفوذ) را به عنوان خروجی‌های مدل در نظر می‌گیرند.

کلاهان و حیدری مدل‌سازی و بهینه‌سازی فرآیند جوشکاری با گاز محافظ و قوس الکتریکی را با استفاده از روش‌های آماری و الگوریتم شبیه‌سازی آنیلینگ مورد بررسی قرار دادند [6]. همچنین بسیاری از تیم‌های تحقیقاتی از مدل‌های شبکه‌ی عصبی مصنوعی به منظور پیش‌بینی پارامترهای هندسی مهره‌ی جوش [7-9] استفاده نموده‌اند. از سوی دیگر، اگر چه تمرکز در روش لایه‌نشانی دومرحله‌ای بر روی کاهش دورریز مواد در عملیات ماشینکاری می‌باشد، اما شکل مهره‌ی جوش نیز از اهمیت زیادی برخوردار است. اکثر مدل‌های ارائه شده به مدل‌سازی مهره‌ی جوش تکی توجه نموده‌اند و رفتار تداخلی مواد در مهره‌های جوش متوالی را نادیده گرفته‌اند[4].

بسیاری از پژوهشگران استفاده از جوش قوس الکتریکی را برای ساخت قطعات بررسی نموده‌اند. تیم‌های تحقیقاتی دیکنز، پرینس، سانگ و کواچویچ [10-13] برخی از پیشگامان تحقیق در این زمینه می‌باشند. برخی از محققین هندسه‌ی مهره‌ی جوش را برای ساخت سریع بررسی نموده‌اند. ایبتی و همکارانش [14] جوشکاری با قوس پلاسما را برای ساخت اشکال هندسی استفاده نموده‌اند. آنها در بررسی خود مهره‌جوش را به صورت منحنی دایروی دارای هم‌پوشانی در نظر گرفتند ولی توضیحی برای ماده انباشته در

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.9.11.3]

ناحیه‌ی هم‌پوشانی ارائه نکردند. چان و همکارانش [7] تخمین سهمی‌شکل را برای مهره‌ی جوش ذکر کرده‌اند اما به جزئیات آن نپرداختند. برخی منابع نیز مهره‌ی جوش سهمی‌شکل را پیشنهاد نموده‌اند [10]. در ادامه‌ی این قسمت به بررسی هندسی مهره‌ی جوش تکی و متوالی سهمی‌شکل بر طبق مدل سوریاکومار [4] و کاروناکارن [5] پرداخته شده است.

2-1- مدل سهمی‌شکل مهره‌ی جوش تکی

لایه‌های ایجاد شده دارای برآمدگی‌هایی می‌باشند که در شکل 4 شماتیک سطح مقطع این برآمدگی‌ها نشان داده شده است.

مدل‌سازی مهره‌ی جوش به منظور برقراری ارتباط بین پارامترهای ورودی و خروجی فرآیند جوشکاری ضروری می‌باشد. پژوهشگران متعددی همچون تامیلاراسی، نارایان و سریراج [15-18] مدل‌سازی و بهینه‌سازی هندسی مهره‌ی جوش تکی را مورد بررسی قرار داده‌اند.

پروفیل مهره‌ی جوش مربوط به این برآمدگی‌ها در این مقاله به صورت سهمی و مطابق شکل 5 در نظر گرفته شده است.

پارامترهای a و c نشان داده شده در شکل 5 را می‌توان به فرم زیر بر حسب w و h بازنویسی کرد [4]:

$$a = h \quad , c = -\frac{4h}{w^2} \tag{1}$$

بنابراین فرم هندسی سهمی عبارتست از:

$$y = h\left[1 - \left(\frac{2x}{w}\right)^2\right] \tag{2}$$

از سوی دیگر، نوشتن رابطه‌ی سهمی بر حسب پارامترهای ورودی فرآیند جوشکاری نیز مفید می‌باشد. با استفاده از مساوی قرار دادن مساحت سطح مقطع مهره‌ی جوش (A) بدست آمده از رابطه‌ی هندسی با رابطه‌ی بدست آمده از پارامترهای فرآیند جوشکاری می‌توان پارمترهای مهره‌ی جوش را محاسبه نمود [4].

رابطه‌ی هندسی مهره‌ی جوش به صورت زیر می‌باشد:

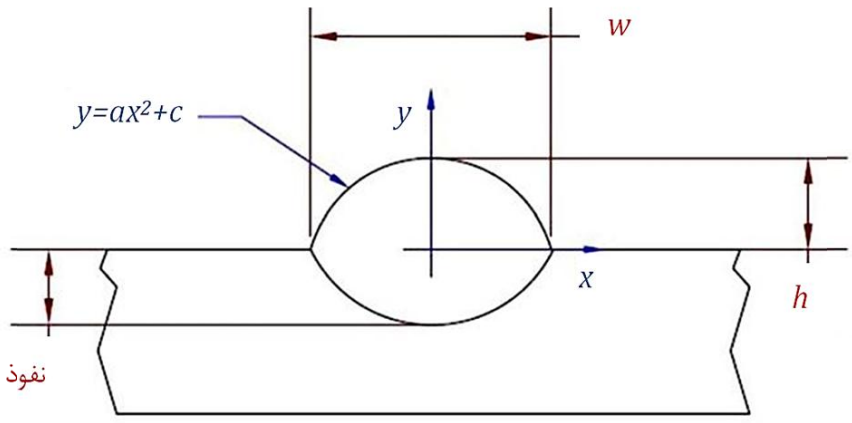
$$A = \frac{2wh}{3} \tag{3}$$

مساحت سطح مقطع مهره‌ی جوش بر حسب پارامترهای فرآیند جوشکاری نیز به صورت زیر می‌باشد:

$$A = \frac{\pi v_w {d_w}^2}{4v_t} \tag{4}$$

که در این رابطه v_w سرعت تغذیه‌ی سیم و v_t سرعت پیشروی جوشکاری می‌باشد.

شکل4 شماتیک سطح مقطع یک لایه‌ی رسوب داده شده پیش از ماشینکاری



شکل5 مقطع مهره‌ی جوش سهمی‌شکل و معادله‌ی مربوطه [4]

بنابراین داریم:

$$A = \frac{2hw}{3} = \frac{\pi v_w {d_w}^2}{4v_t} \tag{5}$$

با توجه به رابطه‌ی 5 عرض مهره‌ی جوش (w) را می‌توان به صورت زیر بدست آورد:

$$w = \frac{3\pi v_w {d_w}^2}{8hv_t} \tag{6}$$

سوریاکومار و همکارانش [4] با استفاده از آزمایش‌های تجربی خود و انطباق نتایج مدل‌سازی با نتایج آزمایش و انجام رگرسیون مدل زیر را برای ارتفاع مهره جوش ارائه کرده‌اند.

$$h = C_1 {v_w}^2 + C_2 {v_t}^2 + C_3 v_w v_t + C_4 v_w + C_5 v_t + C_6 \tag{7}$$

همچنین برای فرآیند جوشکاری با استفاده از سیم جوش ER70S6 و با قطر سیم‌جوش 0/8میلیمتر ضرایب محاسبه‌ی h در معادله‌ی مربوطه به صورت زیر گزارش شده است [4]:

$C_1 = 0.29945E - 02,$ $\quad C_2 = 0.25610E + 01$

$C_3 = -0.13833E + 00,$ $\quad C_4 = 0.18947E + 00$

$C_5 = -0.49778E + 01,$ $\quad C_6 = 0.30299E + 01$

چنان که در شکل 6 نشان داده شده است، مدل مهره‌ی جوش تکی همخوانی بسیار خوبی با نتایج تجربی دارد.

2-2- مدل رسوب جوش مهره‌های متوالی

در فرآیند لایه‌نشانی دومرحله‌ای، هر لایه توسط رسوب تعدادی از خطوط جوش دارای هم‌پوشانی تشکیل می‌شود که در ادامه از عملیات کف‌تراشی به منظور حذف برآمدگی‌های خطوط جوش استفاده می‌شود. ضخامت نهایی هر لایه (t) در واقع ضخامت لایه پس از عملیات ماشینکاری می‌باشد. بازدهی فرآیند (η) برابر با نسبت حجم برجامانده پس از ماشینکاری به حجم اولیه‌ی رسوب داده شده می‌باشد. مقدار η در واقع کارآیی و بهره‌وری فرآیند را نشان می‌دهد. مقادیر t و η دو پارامتر کلیدی در فرآیند لایه‌نشانی دو مرحله‌ای می‌باشند.

کاروناکاران و همکارانش [5] برای تعریف اثر هم‌پوشانی خطوط جوش از مفهوم منحنی پر کننده استفاده نموده‌اند که در شکل 7 دو مهره‌ی جوش سهمی‌شکل متوالی به همراه منحنی پر کننده نشان داده شده است.

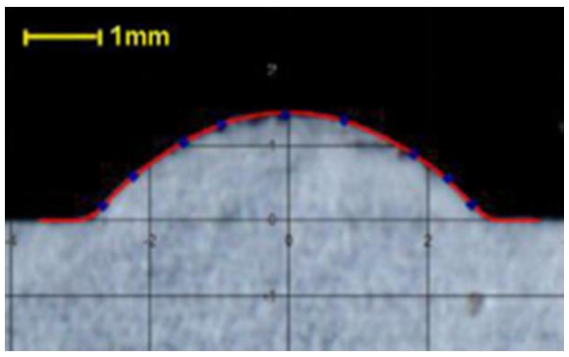
$\bar{P}_1$ و $\bar{P}_2$ دو سهمی‌گون متوالی و $\bar{C}$ منحنی پر کننده می‌باشند. روابط مربوط به هر کدام از این پارامترها را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

$$\bar{P}_1 : y = h\left[1 - \left(\frac{2x}{w}\right)^2\right] \tag{8}$$

$$\bar{P}_2 : y = h\left[1 - \left(\frac{2(x-P)}{w}\right)^2\right] \tag{9}$$

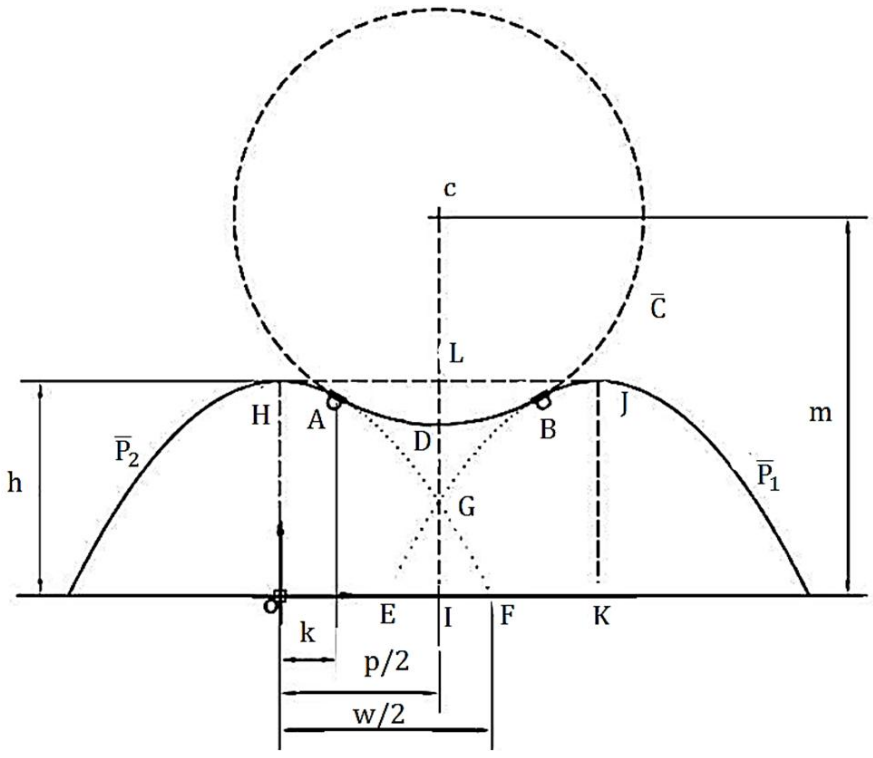
$$\bar{C} : \left(x - \frac{p}{2}\right)^2 + (y - m)^2 = R^2 \tag{10}$$

در روابط بالا R شعاع منحنی پر کننده و m ارتفاع مرکز منحنی پر کننده می‌باشد. یافتن مقادیر R و m بر اساس پارامترهای هندسی جوش h، w و P ضروری می‌باشد [4].



شکل6 انطباق مهره جوش پیش‌بینی‌شده و تصویر مقطع جوش [4]

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.9.11.3]



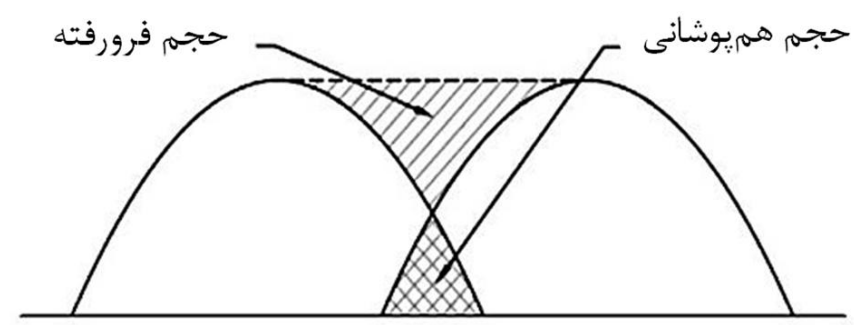
شکل 7 هندسه‌ی دو منحنی سهمی‌شکل دارای هم‌پوشانی و منحنی پر کننده [4]

3- تعریف مسئله‌ی بهینه‌سازی دوهدفه

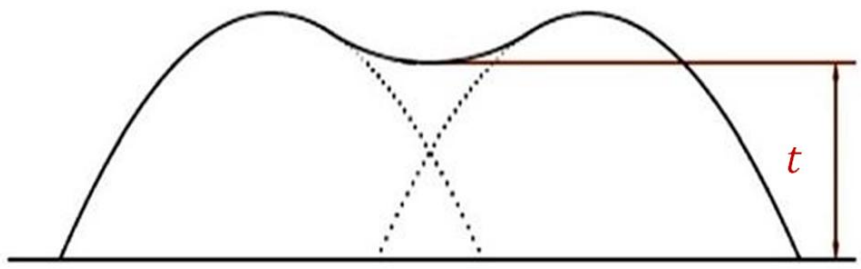
سرعت تغذیه‌ی سیم، سرعت پیشروی و گام جوشکاری سه پارامتر کلیدی فرآیند جوشکاری می‌باشند که بر اساس معیارهای جداگانه‌ی همچون کمترین حرارت ورودی، گستردگی توزیع حرارت، افزایش حجم رسوب و کاهش حجم ماشینکاری انتخاب می‌شوند.

سرعت تغذیه‌ی سیم مستقیماً بر روی حرارت ورودی فرآیند جوشکاری اثرگذار می‌باشد و به منظور کاهش اعوجاج و تنش‌های داخلی قطعات ساخته شده، سرعت تغذیه‌ی سیم تا حد مشخصی قابل افزایش می‌باشد. از سوی دیگر برای یک سرعت تغذیه‌ی سیم مشخص، مساحت مهره‌ی جوش وابسته به سرعت پیشروی جوشکاری خواهد بود، به گونه‌ای که با افزایش سرعت پیشروی مقطع جوش کوچکتر می‌شود و بالعکس [4].

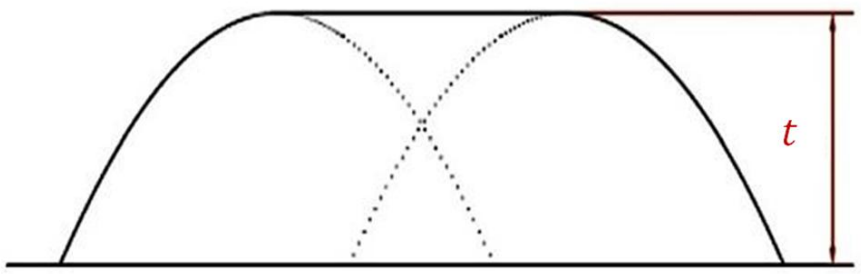
یکی از مزایای افزایش سرعت پیشروی جوشکاری در توزیع حرارت بر روی ناحیه‌ای گسترده‌تر از سطح قطعه‌کار است که این مسئله البته منجر به کاهش بازدهی فرآیند خواهد شد. پارامتر اثرگذار دیگر گام خطوط جوشکاری P می‌باشد. فاصله‌ی گام بر روی شکل منحنی پر کننده تاثیرگذار می‌باشد و چنان که در شکل 8 نشان داده شده است، منجر به تحدب، تقعر و یا تخت شدن آن می‌شود.



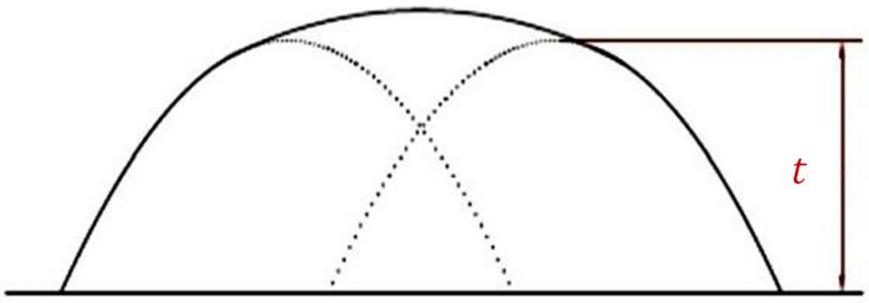
(8- الف) حجم هم‌پوشانی و فضای فرورفته بین دو مهره‌ی جوش متوالی



(8- ب) منحنی مقعر



(8- ج) منحنی تخت



(8- د) منحنی محدب

شکل 8 رفتار رسوب فلز در حالت‌های مختلف، الف: حجم هم‌پوشانی و فضای فرورفته، ب: مقعر، ج: تخت و د: محدب [4]

3-1- گام جوش بهینه

در گام‌های جوش بزرگ منحنی پر کننده $\overline{C}$ به صورت مقعر بوده و با کاهش تدریجی گام، شعاع منحنی پر کننده افزایش می‌یابد تا این که منحنی تبدیل به خط صاف می‌شود که در این حالت $R = \infty$ خواهد بود.

با کاهش بیشتر گام، شکل منحنی به صورت محدب در خواهد آمد. بنابراین زمانی که منحنی به شکل تخت باشد کمترین میزان ماشینکاری نیاز خواهد بود و با تبدیل منحنی به خط صاف حجم ماشینکاری لایه به طرز چشمگیری کاهش یافته و فرزکاری بیشتر جنبه‌ی حذف لایه‌های اکسیدی و ناخالصی‌های سطحی را پیدا می‌کند.

با توجه به هندسه‌ی دو مهره جوش متوالی برای حالت منحنی تخت شرایط زیر به وجود خواهد آمد:

(11-الف) مساحت (EFG) = مساحت (HGJ)

(11-ب) مساحت (EIG) = *مساحت* (HLG)

(11-ج) مساحت (FIG) = مساحت (HLG)

با محاسبه‌ی مساحت‌های مربوطه خواهیم داشت:

$$\int_0^{\frac{p}{2}}(h-y)dx = \int_{\frac{p}{2}}^{\frac{w}{2}} ydx \rightarrow \int_0^{\frac{p}{2}} hdx = \int_0^{\frac{w}{2}} ydx \rightarrow \frac{hp}{2} = \frac{hw}{3}$$

$$p^* = \frac{2w}{3} \qquad (11\text{-د})$$

بنابراین برای تحقق هدف کاهش حجم ماشینکاری لازم است که گام جوش برابر با دو سوم عرض مهره‌ی جوش باشد [5].

3-2- افزایش مساحت مهره‌ی جوش

مساحت مهره‌ی جوش که مترادف با حجم رسوب فرآیند جوشکاری است، بر طبق معادله‌ی 3 رابطه‌ی مستقیمی با ارتفاع و عرض جوش دارا می‌باشد. از سوی دیگر، با توجه به هدف نخست که کاهش حجم ماشینکاری است، معادله‌ی 3 به صورت زیر قابل بازنویسی است:

$$A = \frac{2wh}{3} = p^* \times h \qquad (12)$$

که در این رابطه p^* متناظر با گام جوش بهینه برای کمترین حجم ماشینکاری می‌باشد. بنابراین تنها پارامتر باقی‌مانده در معادله‌ی مربوطه که بتوان از آن برای افزایش مساحت مهره‌ی جوش استفاده نمود، پارامتر ارتفاع

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.9.11.3]

مهره‌ی جوش (h) می‌باشد. بنابراین، با شرط استفاده از گام جوش بهینه، تابع هدف اصلی در اینجا ارتفاع مهره‌ی جوش می‌باشد که طبق معادله‌ی 7 و بر اساس ثابت‌های مربوط به آن قابل محاسبه می‌باشد.

4-قیدهای مسئله‌ی بهینه‌سازی دوهدفه

قیود در نظر گرفته شده برای بیشینه نمودن رابطه‌ی 7 عبارت از قید پایداری قوس الکتریکی و قید حرارت ورودی جوشکاری می‌باشد. در ادامه به هر یک از آنها پرداخته شده است.

4-1- قید پایداری قوس الکتریکی

برای دستیابی به قوس الکتریکی پایدار در فرآیند جوشکاری با سیم جوش ER70S6 با قطر 0/8میلیمتر می‌بایست شدت جریان بین 60 تا 120 آمپر ثانیه تنظیم شود. این بازه‌ی جریان متناظر با دامنه‌ی قابل‌انتخاب 4/7 تا 10/4 متر بر دقیقه برای سرعت تغذیه‌ی سیم و 0/6 تا 1/1 متر بر دقیقه برای سرعت پیشروی جوشکاری می‌باشد [4]. در شکل 9 نمودار قید پایداری قوس برای سیم جوش ER70S6 با قطر 0/8میلیمتر نشان داده شده است. منطقه‌ی هاشور خورده بازه‌ی قوس پایدار برای سیم‌جوش قطر 0/8 میلیمتر می‌باشد.

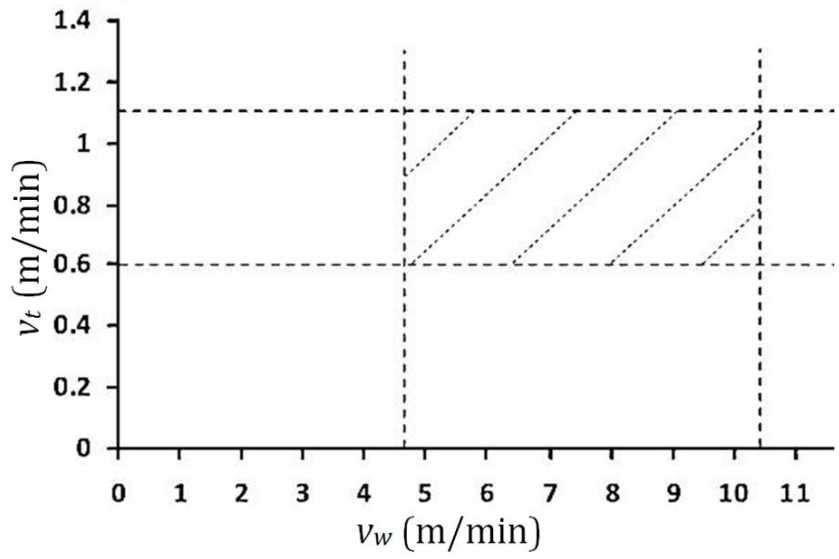
4-2- قید حرارت ورودی جوش

در فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی با الکترود مصرفی و گاز محافظ شدت جریان جوشکاری رابطه‌ی مستقیمی با سرعت تغذیه و قطر سیم جوش دارد. برای مثال در مورد سیم جوش 0/8 میلیمتری از جنس ER70S6 رابطه‌ی بین سرعت تغذیه‌ی سیم و شدت جریان جوشکاری برای تشکیل قوس الکتریکی پایدار مطابق جدول 1 می‌باشد.

از سوی دیگر حرارت ورودی جوش که متاثر از سرعت تغذیه سیم و سرعت پیشروی جوشکاری است تاثیر بسیار زیادی بر روی ساختار متالورژیکی و خصوصیات مکانیکی لایه‌های تشکیل شده می‌گذارد. این پارامتر بر پیشگرم و دمای بین پاسی و در نتیجه بر ساختار و خواص فلز جوش و ناحیه HAZ تاثیر می‌گذارد.

به منظور تعیین مقدار حرارت ورودی از فرمول زیر در جوشکاری قوسی استفاده شده است:

$$H = \frac{60VI}{10^6 v_t} \qquad (13)$$



شکل9 بازه‌ی قوس الکتریکی پایدار برای سیم‌جوش ER70S6 با قطر 0/8

جدول1 مقادیر متناظر جریان و تغذیه برای سیم 0/8 میلیمتری ER70S6 [4]

I (Amps)	60	70	80	90	100	110	120
v_w (m/min)	4/7	5/6	6/5	7/4	8/4	9/4	10/4

در این رابطه H حرارت ورودی بر حسب $\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{mm}}$، V ولتاژ قوس، I شدت جریان بر حسب آمپر ثانیه و v_t سرعت پیشروی جوشکاری بر حسب $\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{min}}$ می‌باشند.

با توجه به داده‌های مربوط به جریان و سرعت پیشروی برای سیم‌جوش 0/8 میلیمتری از جنس ER70S6 و با انجام برازش منحنی توسط جعبه ابزار cftool در نرم افزار متلب، منحنی چند جمله‌ای مرتبه‌ی دوم مناسب برای بیان رابطه‌ی میان جریان و سرعت تغذیه سیم استخراج گردید. رابطه‌ی رگرسیونی بدست آمده به صورت زیر می‌باشد:

$$I = -0.1665{v_w}^2 + 13.03v_w + 2.371 \qquad (14)$$

در این معادله با توجه به تقریب انجام شده، واحد سرعت تغذیه‌ی سیم بر حسب متر بر دقیقه می‌باشد که متناظر با آمپر بر ثانیه خواهد بود.

در شکل 10 نمودار مربوط به رابطه‌ی رگرسیونی بدست آمده نشان داده شده است.

از سوی دیگر، نمودار جریان-ولتاژ در جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ و الکترود مصرفی به صورت ولتاژ ثابت می‌باشد [19]. در شکل 11 این نموار و مناطق مختلف آن نشان داده شده است.

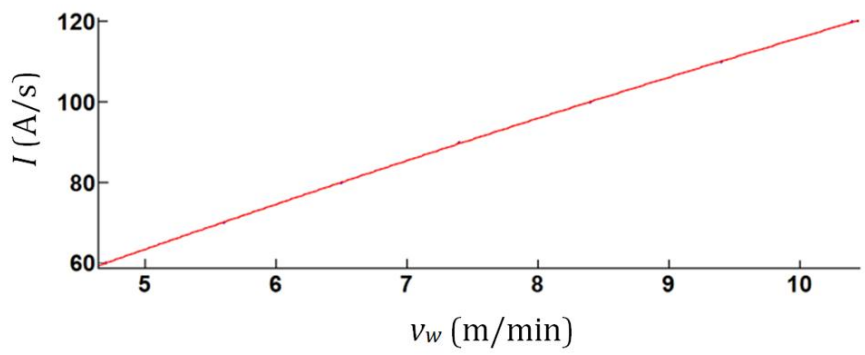
بنابراین، به منظور محاسبه‌ی حرارت ورودی جوش می‌بایست مقدار ولتاژ را نیز محاسبه نموده و در رابطه‌ی 13 جای‌گذاری کرد.

شایان ذکر است در جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ و الکترود مصرفی ولتاژ به صورت مستقیم تنظیم نمی‌شود. بلکه با تنظیم نمودن شدت جریان، دستگاه به صورت خودکار ولتاژ لازم را برای قوس الکتریکی پایدار اعمال می‌نماید.

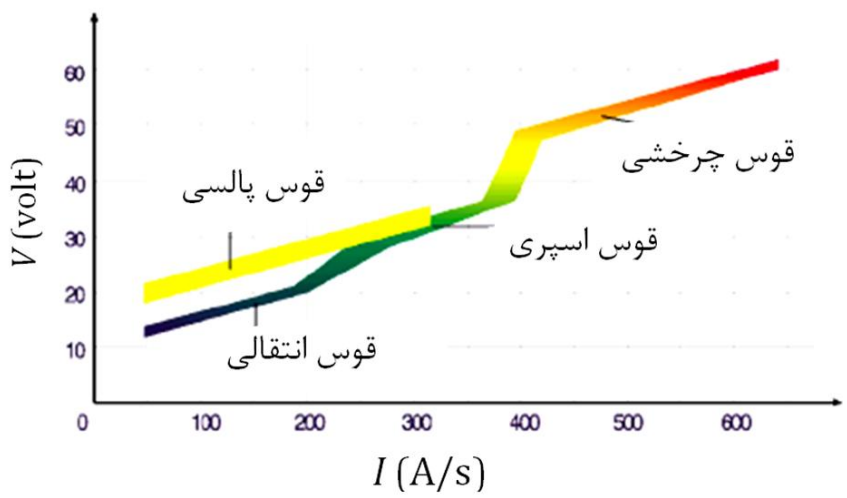
در این مقاله، با توجه به نمودار ارائه شده برای قوس الکتریکی با گاز محافظ و الکترود مصرفی در شکل 11، رابطه‌ی کاربردی زیر در بازه‌ی جریان 40 تا 300 آمپر به کمک رگرسیون خطی استخراج شده است:

$$V = 0.07I + 10.5 \qquad (15)$$

در مقایسه با دیگر روش‌های انتقال فلز، در جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ و الکترود مصرفی، روش اتصال کوتاه پالسی پایین‌ترین نرخ جریان و قطر الکترود را دارا می‌باشد. بنابراین در این روش حوضچه‌ی ذوبی کوچک



شکل10 منحنی رابطه‌ی سرعت تغذیه سیم و جریان



شکل11 منحنی جریان-ولتاژ در فرآیند جوشکاری با گاز محافظ و الکترود مصرفی [19]

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.9.11.3]

و زودسردشونده بدست می‌آید. این خصوصیات روش اتصال کوتاه را برای کمینه‌سازی حرارت جوشکاری برجسته و کاربردی می‌سازد.

کمکو و همکارانش [20] میزان حرارت کمینه را در کار خود بین 0/155 تا 0/2کیلو ژول بر میلیمتر گزارش نموده‌اند. با توجه به این که افزایش نرخ رسوب جوش منجر به افزایش حرارت ورودی می‌گردد، بنابراین در اینجا مقدار میانگینی برای حداکثر حرارت مجاز در این بازه انتخاب شده است تا بدون نقض قید حرارتی رسوب جوش تا حد امکان قابل افزایش باشد. حد وسط بازه‌ی ارائه شده توسط کمیکو 0/18 می‌باشد که از آن عنوان میزان حداکثر حرارت ورودی قابل قبول برای قید حرارت ورودی استفاده شده است:

$$H = \frac{60VI}{10^6 v_t} =< 0.18 \frac{\text{kJ}}{\text{mm}} \quad (16)$$

با توجه به این که شدت جریان مطابق رابطه‌ی 14 تنها به پارامتر v_w وابسته می‌باشد، در نتیجه قید حرارتی مسئله که در رابطه‌ی 16 تبلور یافته است، تنها به دو پارامتر فرآیندی سرعت تغذیه‌ی سیم و سرعت پیشروی جوشکاری وابسته می‌باشد.

در رابطه‌ی 16 هر دو پارامتر بر حسب متر بر دقیقه می‌باشند. در شکل 12 نیز منحنی ترسیم شده از حرارت ورودی مطابق معادله‌ی 16 نشان داده شده است.

در ادامه بهینه‌سازی مدل پیشنهاد شده مورد بحث قرار گرفته است.

5-بهینه‌سازی مقید

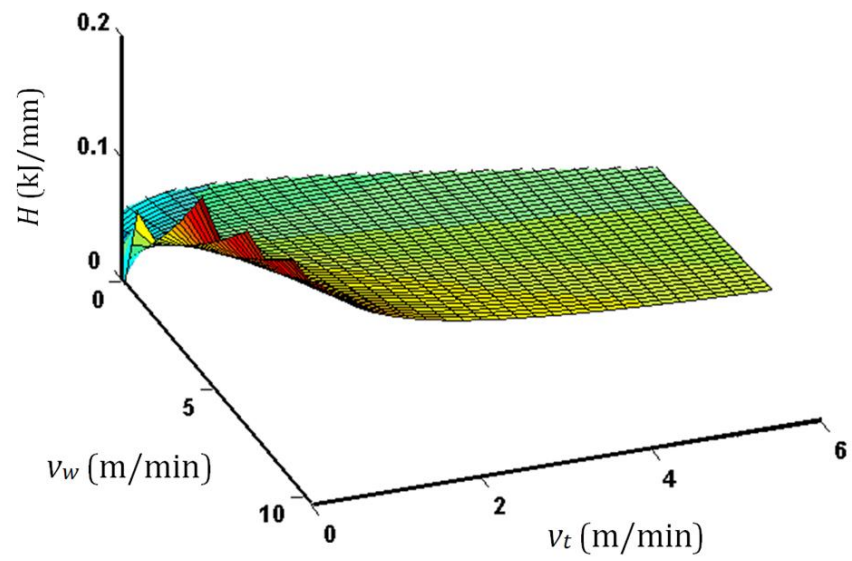
در اینجا به منظور یافتن پاسخ بهینه برای مسئله از روش بهینه‌یابی الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. برای این منظور جعبه‌ابزار الگوریتم ژنتیک در نرم‌افزار متلب بکار گرفته شده است.

5-1- بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک

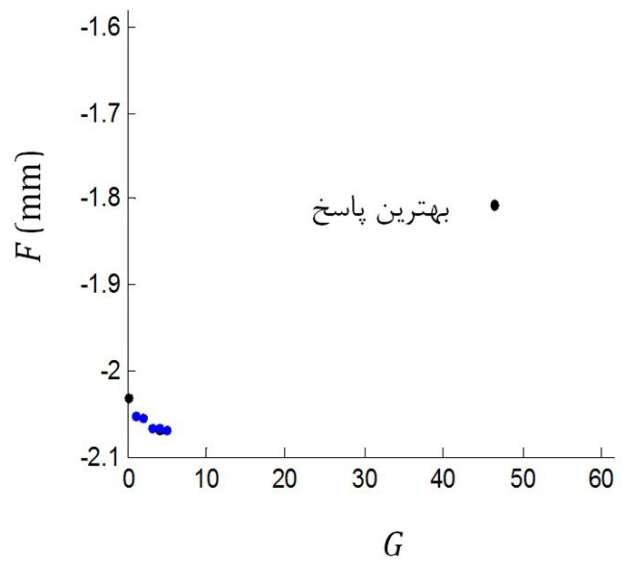
برای این منظور دو برنامه‌ی جداگانه برای تعریف تابع هدف و همچنین قید غیرخطی مسئله نوشته شده و به پنجره‌ی نوار ابزار GA در نرم‌افزار متلب وارد گردید. سپس کران‌های مسئله نیز برای نرم‌افزار تعریف شد. در گام بعد تنظیمات الگوریتم ژنتیک انجام شد.

اندازه‌ی جمعیت برابر با 20 و میزان عملگر پیوند برابر با 80 درصد انتخاب گردید. معیار پایان حل نیز بر اساس بهترین پاسخ برگزیده شد.

نمودار روند یافتن بهترین پاسخ برای یکی از شبیه‌سازی‌های انجام شده در شکل 13 نشان داده شده است. در این نمودار G معرف تعداد نسل و F بیانگر مقدار تابع شایستگی می‌باشد. با انجام شبیه‌سازی، الگوریتم ژنتیک بهترین پاسخ را با توجه به تابع هدف و قید در نظر گرفته شده مطابق جدول2 پیشنهاد نموده است.



شکل12 منحنی حرارت ورودی



شکل13 نموداری از روند یافتن بهترین پاسخ در GA

جدول2 مقادیر مربوط به بهترین پاسخ الگوریتم ژنتیگ

v_w (m/min)	v_t (m/min)
8/4	0/6

با توجه به پارامترهای ورودی بهینه‌ی پیشنهاد شده توسط الگوریتم ژنتیک، بیشترین ارتفاع دست‌یافتنی با توجه به قید حرارتی مسئله برابر با 2/07 میلیمتر در هر پاس جوشکاری می‌باشد.

در نتیجه پهنای جوش با توجه به رابطه‌ی 6، برابر با 5/1 میلیمتر بدست می‌آید. گام جوشکاری بهینه نیز مطابق رابطه‌ی 11، برابر با 3/4 میلیمتر می‌باشد. در نتیجه بیشترین مساحت بهینه‌ی مقید برای مهره‌جوش با توجه به رابطه‌ی 12 برابر با 7/04 میلیمتر مربع است. همچنین حرارت ورودی برای این حالت 0/175 کیلوژول بر میلیمتر خواهد بود.

نرخ رسوب جوش توسط رابطه‌ی زیر برای پاسخ بهینه بدست می‌آید:

$$V_d = A \,.\, v_t \quad (17)$$

در این رابطه V_d نرخ رسوب، A مساحت مهره‌جوش و v_t سرعت پیشروی مشعل جوشکاری می‌باشد. با توجه به پارامترهای بهینه‌ی استخراج شده، نرخ رسوب جوش بهینه برابر با $4224\ \text{mm}^3/\text{min}$ بدست می‌آید.

5-2- اعتبارسنجی و بررسی نتایج

به منظور بررسی صحت روش و نتایج بدست آمده در این مقاله، از نتایج آزمایشگاهی جامع ارائه شده در پژوهش سوریاکومار [4] و همکارانش استفاده شده است. جدول 3 ارتفاع مهره‌جوش‌های مربوط به سیم‌جوش ER70S6 با قطر 0/8میلیمتر و پارامترهای جوشکاری مربوطه را نشان می‌دهد. با نگاهی به نتایج آزمایش، تنها در مهره‌جوش‌های شماره‌ی 6، 7 و 14 مقادیر ارتفاع بالاتر از بهینه‌ی پیشنهادی می‌باشد که باید قید حرارتی در آنها بررسی شود. نتایج این بررسی در جدول 4 ارائه شده است.

با نگاهی به نتایج آزماش، تنها در مهره‌جوش‌های شماره‌ی 6، 7 و 14 مقادیر ارتفاع بالاتر از بهینه‌ی مقید پیشنهادی می‌باشد که بایستی قید حرارتی را در آنها بررسی نمود. نتایج این بررسی در جدول 4 ارائه شده است.

بنابراین عدم پذیرش پارامترهای متناظر با سه مهره‌جوش 6، 7 و 14 به عنوان مقادیر بهینه را چنان که نشان داده شده است، بایستی در نقض شدن قید حرارتی مسئله جستجو نمود. به طوری که قید حرارتی مسئله برابر با 0/18 کیلو ژول بر میلیمتر در نظر گرفته شده است و در سه جوش بررسی شده در جدول 4 مقدار حرارت تولید شده به مراتب بالاتر از حد مجاز مسئله است. بنابراین می‌توان کارآمدی رویکرد ارائه شده برای بهینه‌سازی دوهدفه فرآیند لایه‌نشانی دومرحله‌ای را با توجه به رعایت میزان حرارت ایجاد شده در مرحله‌ی جوشکاری به خوبی نشان داد.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.9.11.3]

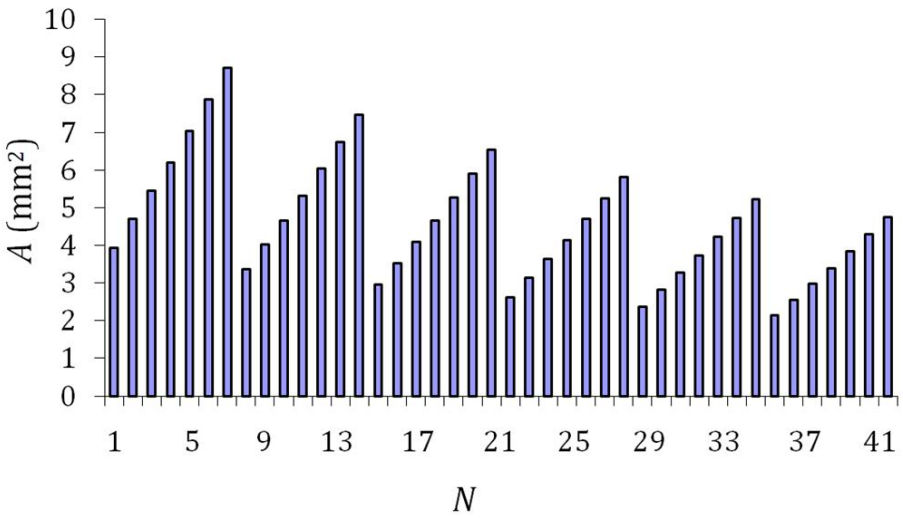
جدول3 مقادیر تجربی بدست آمده برای سیم‌جوش 0/8 میلیمتری ER70S6 [4]

h (mm)	v_t (m/min)	v_w (m/min)		h (mm)	v_t (m/min)	v_w (m/min)	
1/001	0/9	4/7	22	1/451	0/6	4/7	1
1/001	0/9	5/6	23	1/571	0/6	5/6	2
1/108	0/9	6/5	24	1/813	0/6	6/5	3
1/152	0/9	7/4	25	1/686	0/6	7/4	4
1/282	0/9	8/4	26	2/06	0/6	8/4	5
1/316	0/9	9/4	27	2/09	0/6	9/4	6
1/498	0/9	10/4	28	2/553	0/6	10/4	7
0/724	1	4/7	29	1/436	0/7	4/7	8
1/023	1	5/6	30	1/53	0/7	5/6	9
1/154	1	6/5	31	1/604	0/7	6/5	10
1/307	1	7/4	32	1/734	0/7	7/4	11
1/198	1	8/4	33	1/905	0/7	8/4	12
1/277	1	9/4	34	1/847	0/7	9/4	13
1/470	1	10/4	35	2/189	0/7	10/4	14
0/784	1/1	4/7	36	1/171	0/8	4/7	15
0/982	1/1	5/6	37	1/304	0/8	5/6	16
1/138	1/1	6/5	38	1/423	0/8	6/5	17
1/185	1/1	7/4	39	1/460	0/8	7/4	18
1/210	1/1	8/4	40	1/523	0/8	8/4	19
1/289	1/1	9/4	41	1/661	0/8	9/4	20
1/394	1/1	10/4	42	1/997	0/8	10/4	21

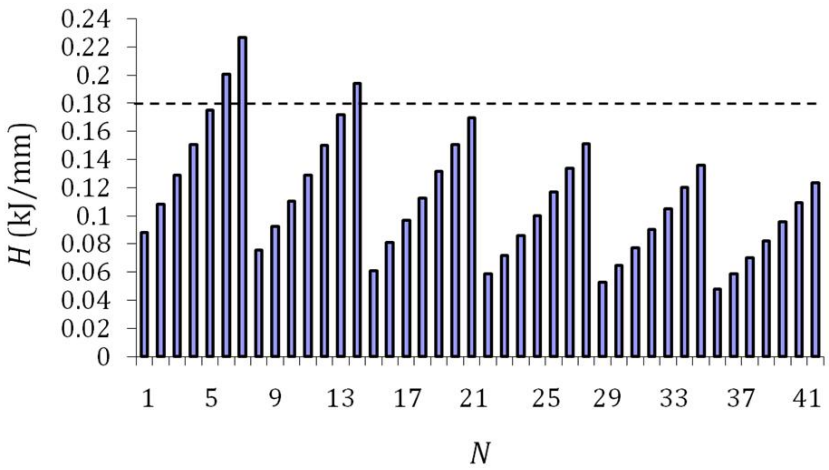
جدول4 اعتبارسنجی مدل با مقایسه‌ی مهره‌جوش‌های مردود و مهره‌جوش بهینه

H (kJ/mm)	V (volt)	I (A/s)	h (mm)	v_t (m/min)	v_w (m/min)	
0/175	17/5	100/075	2/07	0/6	8/4	جوش 5
0/2005	18/2	110/14	2/09	0/6	9/4	جوش 6
0/2265	18/9	119/883	2/553	0/6	10/4	جوش 7
0/194	18/9	119/883	2/189	0/7	10/4	جوش 14

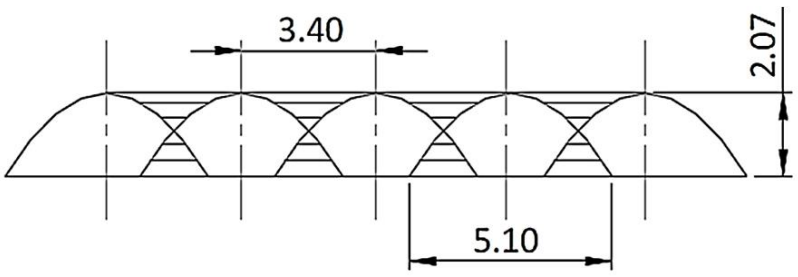
در شکل 14 و 15 به ترتیب مقادیر محاسبه شده برای مساحت مهره‌جوش و حرارت تولید شده برای تک تک مهره‌جوش‌های ارائه شده در جدول 3 آورده شده است. N بیانگر شماره‌ی مهره‌جوش می‌باشد. در شکل 16 نیز شمایی از لایه‌ی نهایی نشان داده شده است. همچنین در شکل 17 هندسه‌ی ناحیه‌ی هم‌پوشانی دو مهره‌جوش مجاور و ناحیه‌ی انباشت فلز برای پاسخ بهینه آورده شده است.



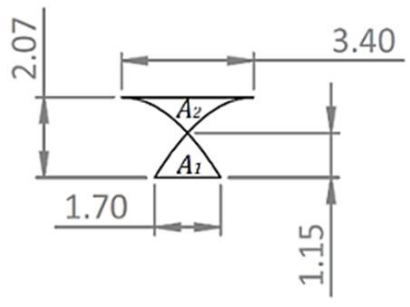
شکل14 مساحت مهره‌جوش‌های بررسی شده



شکل15 حرارت تولید شده برای هر کدام از مهره‌جوش‌ها



شکل16 شمایی از مقطع لایه‌ی بهینه با توجه به ناحیه‌ی هم‌پوشانی و ناحیه‌ی انباشت فلز (ابعاد به mm)



شکل17 هندسه‌ی ناحیه‌ی هم‌پوشانی A_1 و ناحیه انباشت فلز A_2 برای مهره‌جوش بهینه (ابعاد به mm)

چنان که در شکل‌های 14 و 15 قابل‌مشاهده می‌باشد، همگام با افزایش سطح مقطع جوش، حرارت ورودی نیز افزایش می‌یابد. با توجه به قید حرارت ورودی که در شکل 15 به صورت خط‌چین افقی نشان داده شده است، نزدیک‌ترین گزینه‌ای که خط‌چین را قطع ننموده باشد، مهره‌جوش شماره‌ی 5 است که در واقع پاسخ بهینه‌ی الگوریتم ژنتیک نیز می‌باشد. همچنین، در این دو نمودار تاثیر افزایش نرخ پیشروی بر کاهش مساحت سطح‌مقطع جوش و کاهش حرارت ورودی در کل نمودار و تاثیر نرخ تغذیه‌ی سیم بر افزایش سطح مقطع جوش و حرارات ورودی در نمونه‌های دارای سرعت پیشروی یکسان به خوبی نمایان می‌باشد.

به منظور بررسی صحت نتایج مربوط به هدف کاهش حجم ماشینکاری، مساحت ناحیه‌ی همپوشانی A_1 و مساحت ناحیه‌ی انباشت فلز A_2 برای مهره‌جوش بهینه محاسبه گردید. بدین منظور از نرم‌افزار سالیدورکس[1] برای اندازه‌گیری مساحت استفاده شده است. معادله‌ی سهمی مهره‌جوش بهینه برای تعریف در نرم‌افزار بر طبق رابطه‌ی 2 به صورت زیر بدست آمده است.

$$y = 2.07\left(1-\left(\frac{x}{2.55}\right)^2\right) \quad (18)$$

با ترسیم منحنی‌های جوش چنان که در شکل‌های 16 و 17 نشان داده شده است و انتخاب دستور اندازه‌گیری در نرم‌افزار سالیدورکس، نتایج زیر برای مساحت دو سطح بدست آمده است.

$$A_1 = A_2 = 1.04\ \text{mm}^2 \quad (19)$$

بنابراین شرط کمترین حجم ماشینکاری نیز به طور کامل برآورده شده است.

1- SolidWorks

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.9.11.3]

در قسمت بعد به نتیجه‌گیری و جمع‌بندی مطالب پرداخته شده است.

6-نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مقاله به مطالعه و بررسی مراحل ساخت افزایشی و کاهشی در فرآیند لایه‌نشانی دومرحله‌ای برای دستیابی به هندسه‌ی قطعه پرداخته شده است. برای این منظور در ابتدا به توانمندی‌های فرآیند اشاره گردید و در ادامه به دو گام کلیدی در این فرآیند که عبارتند از مرحله‌ی جوشکاری و مرحله‌ی ماشینکاری، پرداخته شد. سپس صورت مسئله که شامل رسیدن به دو هدف متناقض کاهش حجم ماشینکاری و افزایش حجم رسوب جوش می‌باشد، بیان گردیده و به دنبال آن روابط ریاضی-تحلیلی پایه‌ریزی شد. پس از دستیابی به تابع هدف، قیدهای مسئله که شامل قیدهای فرآیندی و حرارتیمی‌باشند نیز تعریف و به بدنه‌ی مسئله افزوده شدند.

کلیدی‌ترین قید مورد بررسی حرارت جوشکاری می‌باشد که با ادغام روابط موجود این قید تنها به دو پارامتر اصلی جوشکاری وابسته گردید. سپس با برنامه‌نویسی در محیط نرم‌افزار متلب و استفاده از جعبه‌ابزار الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی تابع هدف مقید صورت پذیرفت. در گام آخر نیز با استفاده از داده‌های تجربی موجود از فرآیند جوشکاری مربوطه، اعتبارسنجی نتایج نیز به انجام رسید. چنان که این مقایسه کارآیی و اعتبار مدل و روش ارائه شده را به خوبی نشان می‌دهد. همچنین با استفاده از نرم‌افزار طراحی سه‌بعدی، هندسه‌ی بهینه بررسی شده و تحقق هدف کمترین حجم ماشینکاری تایید گردید. با توجه به نتایج، مقادیر سرعت تغذیه و سرعت پیشروی بهینه در فرآیند لایه‌نشانی دومرحله‌ای برای سیم جوش ER70S6 با قطر 0/8 mm به ترتیب برابر با 8/4 m/min و 0/6 m/min پیشنهاد شده است و ارتفاع جوش بهینه‌ی مقید نیز برابر با 2/07 mm بدست آمده است.

7-مراجع

[1] K. Karunakaran, A. Sreenathbabu, P. Vishal, Hybrid layered manufacturing:direct rapid metal tool-making process, *I MECH E Journal of Engineering Manufacture,* Vol. 218, No. B12, pp. 1657–65, 2004.

[2] A. Sreenathbabu, KP. Karunakaran, C. Amarnath, Statistical process design for hybrid adaptive layer manufacturing. *Rapid Prototyping Journal,* Vol. 11, No. 4, pp. 235–48, 2005.

[3] K. Karunakaran, S. Suryakumar, Vishal Pushpa, Retrofitment of a CNC machine for hybrid layered manufacturing, *Int. Journal of Advanced Manufacturing Technol*ogy, Vol. 45, pp. 690–703, 2009.

[4] S. Suryakumar et al, Weld bead modeling and process optimization in Hybrid Layered Manufacturing, *Computer-Aided Design,* Vol. 43, pp. 331–344, 2011.

[5] K. Karunakaran, S. Suryakumar, V.Pushpa, S. Akula, Low cost integration of additive and subtractive processes for hybrid layered manufacturing, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing,* Vol. 26, pp. 490–499, 2010.

[6] F. Kolahan, M. Heidari, Modeling and Optimization of Gas Metal Arc Welding Process Using Statistical Methods and Simulated Annealing Algorithm, *Journal of Faculty of Mechanical Eng. of Tabriz University,* Vol. 40, No. 1, 2010. (In Persion)

[7] B. Chan, J. Pacey, M. Bibby, Modelling gas metal arc weld geometry using artificial neural network technology, *Canadian Metallurgical Quarterly,* Vol. 38, No.1, pp. 43–51, 1999.

[8] D. Nagesh, G. Datta, Prediction of weld bead geometry and penetration in shielded metal arc welding using artificial neural networks, *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 123, pp. 303–12, 2002.

[9] I. Kim, J, Son, C, Park, I, Kim, H, Kim, An investigation into an intelligent system for predicting bead geometry in gma welding process, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 159, pp. 113–8, 2005.

[10] J. Spencer, P. Dickens, C. Wykes, Rapid prototyping of metal parts by threedimensional welding, *I MECH E Journal of Engineering Manufacture Part B,* Vol. 212, pp. 175–82, 1998.

[11] R. Merz, F. Prinz, K. Ramaswami, M. Terk, L. Weiss, Shape deposition manufacturing,In, *Proceedings of solid freeform symposium,* pp. 1–8, 1994.

[12] A. Song, S. Park, Experimental investigations into rapid prototyping of composites by novel hybrid deposition process, *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 171, pp. 35–40, 2006.

[13] R. Kovacevic, Rapid prototyping technique based on 3D welding, *NSF design & manufacturing grantees conference,* 1999.

[14] W. Aiyiti, W. Zhao, B. Lu, Y. Tang, Investigation of the overlapping parameters of MPAW-based rapid prototyping, *Rapid Prototyping Journal,* Vol. 12, No. 3, pp. 165–72, 2006.

[15] P. Thamilarasi S. Ragunathan, E. Mohankumar, Modeling and Analysis of the Weld Bead Geometry in Robotic Gas Metal Arc welding by using Taguchi Techniques, *International Journal of Research in Mechanical Engineering,* Vol. 2, Issue 2, pp.88-93, 2014.

[16] K. Narayan C. Ramakrishna, M. Sarcar, K.M. Rao., Optimization of CO2 Welding Process Parameters for Weld Bead Penetration of SS41 Mild Steel Using Response Surface Methodology, *IJRMET,* Vo l. 4, IssuE spl., pp. 27-30 2013.

[17] P. Sreeraj, T, Kannan, S. Maji, Prediction and optimization of weld bead geometry in gas metal arc welding process using RSM and fmincon, *Journal of Mechanical Engineering Research,* Vol. 5, pp. 154-165, 2013.

[18] P. Sreeraj, T, Kannan, S. Maji, Prediction and Control of Weld Bead Geometry in Gas Metal Arc Welding Process Using Simulated Annealing Algorithm, *International Journal Of Computational Engineering Research,* Vol. 3 Issue. 1, pp. 213-222, 2013.

[19] *Digitally controlled GMA power sources,* Accessed November 2014; https://www.fronius.com/cps/rde/xbcr/SID-1712A58FB7944912-/fronius_usa/04_digital_geregelte_msg_stromquellen_gb.pdf

[20] I. Kmecko, D. Hu, and R. Kovacevic, Controlling Heat Input, Spatter and Weld Penetration in GMA Welding For Solid Free Form Fabrication, *The 10th Solid Freeform Fabrication Symposium,* The University of Texas,1999.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.9.11.3]