Archive of SID

ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2019;19(10):2455-2462

Optimization and Modeling of Plasma Cutting of AISI 309 Stainless Steel by Using Neural Network-Genetic Algorithm Hybrid Model

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Mirabdolahi S.M.[1] *MSc,*
Abootorabi M.M.*[2] *PhD*

How to cite this article
Mirabdolahi S.M, Abootorabi M.M. Opti-mization and Modeling of Plasma Cutting of AISI 309 Stainless Steel by Using Neural Network-Genetic Algorithm Hybrid Model. Modares Mechanical Engineering. 2019;19-(10):2455-2462.

ABSTRACT

In plasma cutting, a noble gas at high speed is blown from the nozzle and ionized with the help of a frequency spark at high voltage and an electric arc is created which cause the gas changes to the plasma state. Plasma cutting is an ideal process for cutting of the hard metals. In this research, the effect of the input parameters and their optimization in plasma cutting of AISI 309 stainless steel were studied. By conducting the different experimental tests, the effect of input parameters including amperage, gas pressure and the cutting speed of torch on the three output parameters of the width of cut (Kerf), heat-affected zone (HAZ) and surface roughness (Ra) were investigated. Analysis of the results showed that the amperage, cutting speed and gas pressure have the highest impact on the output parameters, respectively. The artificial neural network (ANN)-genetic algorithm was used to predict and optimize the output parameters. The results indicate that the artificial neural networks model trained by the genetic algorithm are able to predict the output parameters accurately. Finally, the optimization of output parameters to achieve the best cutting conditions was carried out using the genetic algorithm. The artificial neural network models were considered as the objective function and also, the parameters of the heat-affected zone, surface roughness, and the width of cut were introduced as inputs of the algorithm. According to results, a combination of the neural network and genetic algorithm is an efficient method for optimization of the plasma cutting process. This method can be easily modified and utilized for other advanced cutting methods.

Keywords Plasma cutting; ANN; Kerf; HAZ; Ra

[1]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran
[2]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

Correspondence
Address: : Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Yazd University, Yazd, Iran
Phone: +98 (35) 31233024
Fax: +98 (35) 38212781
abootorabi@yazd.ac.ir

Article History
Received: May 23, 2018
Accepted: February 23, 2019
ePublished: October 22, 2019

CITATION LINKS

[1] The 2017 plasma roadmap: Low temperature plasma science and technology [2] Parametric optimization on plasma arc cutting machine for AISI 1018 [3] Fundamentals of plasma physics [4] Plasma beam radius compensation-integrated torch path planning for CNC pipe hole cutting with welding groove [5] Process optimization in non-conventional processes: Experimentation with plasma arc cutting [6] Numerical and experimental study of a plasma cutting torch [7] Fine plasma cutting of advanced aerospace materials [8] Non-equilibrium modelling of an oxygen-plasma cutting torch [9] High tolerance plasma arc cutting of commercially pure titanium [10] Current status of high tolerance plasma arc cutting in Japan [11] Influence of gas composition on plasma arc cutting of mild steel [12] Comparison metal water jet cutting with laser and plasma cutting [13] Taguchi-based Six Sigma approach to optimize plasma cutting process: An industrial case study [14] Modeling the plasma arc cutting process using ANN [15] Effects of nanocrystallization on the corrosion behavior of 309 stainless steel [16] Effect of process parameters on cut quality of stainless steel of plasma arc cutting using hybrid approach

Copyright© 2019, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

www.SID.ir

Archive of SID

بهینه‌سازی و مدل‌سازی برشکاری پلاسما فولاد ضد زنگ AISI۳۰۹ به کمک مدل ترکیبی شبکه عصبی- الگوریتم ژنتیک

سیدمصطفی میرعبداللهی MSc
گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران
محمدمهدی ابوترابی* MD
دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس فنی و مهندسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

چکیده
در برش پلاسما، یک گاز نجیب با سرعت بالا از نازل دمیده می‌شود و به کمک یک جرقه فرکانسی ولتاژ بالا، گاز در سر مشعل یونیزه شده و قوس الکتریکی ایجاد می‌شود. سپس گاز به حالت پلاسما تبدیل می‌شود که فرآیندی ایده‌آل برای برشکاری فلزات سخت است. در این تحقیق، بهینه‌سازی و مطالعه اثر پارامترهای مؤثر در فرآیند برشکاری پلاسما فولاد ضدزنگ AISI۳۰۹ مورد بررسی قرار گرفت. با انجام آزمایش‌های تجربی، تأثیر پارامترهای ورودی شامل شدت جریان، فشار گاز و سرعت حرکت مشعل روی ۳ پارامتر خروجی شامل اندازه عرض برش، منطقه متأثر از حرارت و زبری سطح بررسی شد. تحلیل نتایج نشان داد که شدت جریان، سرعت پیشروی و فشار گاز به ترتیب بیشترین اثر را روی پارامترهای خروجی دارند. از شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و الگوریتم ژنتیک برای پیش‌بینی و بهینه‌سازی پارامترهای خروجی استفاده شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد مدل شبکه عصبی دقت مناسبی برای پیش‌بینی پارامترهای خروجی دارد. بهینه‌سازی پارامترها برای دستیابی به بهترین شرایط برشکاری با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک انجام گرفت. مدل شبکه عصبی به‌عنوان تابع هدف و زبری سطح، اندازه شکاف و منطقه متأثر از حرارت به‌عنوان ورودی الگوریتم ژنتیک معرفی شدند. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهند که ترکیب شبکه عصبی- الگوریتم ژنتیک یک روش کارآمد برای بهینه‌سازی فرآیند برشکاری پلاسما است. این روش می‌تواند برای دیگر فرآیندهای برشی پیشرفته نیز اصلاح و به کار گرفته شود.

کلیدواژه‌ها: برشکاری پلاسما، شبکه عصبی، عرض برش، منطقه متأثر از حرارت، زبری سطح

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۳/۲
تاریخ‌پذیرش: ۱۳۹۷/۱۲/۴
*نویسنده مسئول: abootorabi@yazd.ac.ir

۱- مقدمه

پلاسما به همراه ۳ فاز دیگر یعنی جامد، مایع و گاز به عنوان ۴ حالت اصلی ماده شناخته می‌شود. در واقع حالت چهارم ماده یعنی پلاسما شبیه گاز است و از اتم‌هایی تشکیل شده است که تمام یا تعدادی از الکترون‌های خود را از دست داده‌اند (یونیزه شده‌اند). وقتی تعداد خاصی از اتم‌ها، الکترون‌های خود را از دست دهند و به یون تبدیل شوند، گاز به حالت پلاسما تغییر پیدا می‌کند[1]. فرآیند تولید پلاسما از گاز با افزایش حرارت امکان‌پذیر است.

پلاسما در صنعت کاربردهای گسترده‌ای دارد که یکی از مهم‌ترین آنها برش قطعات است. برش پلاسما در سال ۱۹۸۰ از جوش پلاسما منتج گردید و در دهه ۱۹۹۰ به‌عنوان یک روش بسیار کارآمد برای برش ورق و صفحات فلزی معرفی گردید[2]. در این فرآیند، فولاد یا سایر فلزات در ضخامت‌های مختلف به‌وسیله یک مشعل پلاسما برش داده می‌شود. در برش پلاسما، یک گاز نجیب (در برخی موارد هوای فشرده) با سرعت بالا از نازل دمیده شده و در همان لحظه به کمک یک جرقه فرکانس و ولتاژ بالا، هوا در سر مشعل یونیزه شده و قوس الکتریکی ایجاد می‌گردد و گاز به حالت پلاسما تبدیل می‌شود[3]. قوس پلاسما دارای حرارت بسیار بالایی است و دمای آن به حدود ۲۵۰۰۰°C می‌رسد[4]. برش پلاسما روی هر نوع فلز رسانا و انواع فولادها، آلیاژهای غیرآهنی و غیره می‌تواند به کار گرفته شود.

دستگاه‌های برش پلاسما در شکل‌ها و طرح‌های متفاوتی در دسترس هستند. این فرآیند به راحتی با استفاده از دستگاه‌های CNC و ربات‌ها خودکار می‌شود. در حال حاضر بازوهای روباتی غول‌پیکر یا کوچک قادر به ایجاد برش‌های بسیار کوچک و دقیق هستند. در این روش هنگام شروع فرآیند لزومی به تماس قطعه‌کار با مشعل نیست. در ماشین‌های پیشرفته‌تر جهت تنظیم ارتفاع مشعل از سطح قطعه کار لازم است قبل از شروع، نوک شعله به قطعه کار مماس شده و سپس یک گپ مناسب ایجاد گردد[5]. از مزایای عمده روش برش پلاسما می‌توان به سرعت برش بسیار بالا در مقایسه با دیگر روش‌های برشکاری، عدم استفاده از گازهای بسیار اشتعال‌پذیر، امکان برش فلزات از ضخامت زیر ۱میلی‌متر تا بیشتر از ۱۵۰میلی‌متر، دما و تمرکز انرژی بالا و منطقه متأثر از حرارت کم نسبت به سایر روش‌های برشکاری اشاره نمود[6] .

مهم‌ترین پارامترهای ورودی در این فرآیند شامل شدت جریان، سرعت حرکت مشعل، فاصله مشعل تا قطعه‌کار و فشار گاز است. همچنین مهم‌ترین پارامترهای خروجی در برش پلاسما عبارتند از: عرض برش (Kerf)، نرخ برداشت ماده، تعامد سطح برش‌خورده نسبت به سطح افق و کیفیت سطح منطقه برش‌خورده[7]. با وجود پیشرفت تکنولوژی در این زمینه، بهینه‌سازی پارامترهای ورودی به‌منظور به‌دست‌آوردن خروجی‌های مطلوب در برش آلیاژهای مختلف همچنان چالش‌برانگیز است.

در سال‌های اخیر تحقیقات گسترده‌ای جهت بررسی تجربی و مدل‌سازی فرآیند برشکاری پلاسما انجام شده است. بیشتر تحقیقات انجام‌شده روی بهبود کلی فرآیند متمرکز بوده است[8]. *گیریبلدی* و *پرویتالی* در سال ۲۰۰۵ یک ارزیابی کیفی کامل در برشکاری پلاسمای تیتانیوم در سرعت‌های برش متفاوت و با دو گاز مختلف انجام دادند[9]. نتایج تحقیق آنها نشان داد که ضخامت لایه متأثر از حرارت با استفاده از گاز نیتروژن، بیشتر از حالتی است که از اکسیژن استفاده شود. *هولت* و همکاران تأثیر پارامترهای مختلف بر اندازه عرض شیار را بررسی کردند[7]. آنها اعلام کردند که هندسه و زوایای ایجادشده در دو طرف شیار، غیرمتقارن و مرتبط با خاصیت چرخشی و پراکندگی شعله پلاسما است. با بهینه‌سازی پارامترها این محققان توانستند عرض شیاری کمتر از ۱mm با منطقه متأثر از حرارت بسیار کم به‌دست آورند.

ماتسویاما با انجام تحقیقات تجربی روی برشکاری پلاسمای فولاد نتیجه گرفتند که هندسه شیار ایجادشده تابعی از سرعت برش و شدت جریان است[10]. *اماکریشنان* و همکاران با انجام تحقیقات تجربی به این نتیجه رسیدند که در برشکاری پلاسمای فولاد نرم، گاز اکسیژن بهترین عملکرد را داراست و موجب افزایش راندمان برش می‌گردد[11]. آنها همچنین اعلام کردند که هندسه شیار ایجادشده علاوه بر پارامترهای ورودی فرآیند، تابعی از نحوه تشکیل حوضچه مذاب اولیه است. *کراکارز* در سال ۲۰۱۴ سه روش برش پلاسما، واترجت و لیزر را در برشکاری فولادها با هم مقایسه نمود[12]. مطابق نتایج این تحقیق، برش پلاسما در برشکاری فولادها با ضخامت بالا بهترین عملکرد را دارد.

علاوه بر انجام تحقیقات تجربی، تلاش‌های متعددی نیز جهت بهینه‌سازی و مدل‌سازی این روش صورت گرفته است. *چن* و همکاران در سال ۲۰۰۹ از روش بهینه‌سازی ۶سیگما برای بهینه‌سازی برش پلاسما استفاده کردند[13]. با بهینه‌سازی فرآیند، نرخ پیشروی ۹۳اینچ در دقیقه، ولتاژ ۱۰۰ولت و شدت جریان

www.SID.ir

Archive of SID

۶۳آمپر به‌دست آمد که انجام آزمایش تجربی نیز شرایط بهینه را با انتخاب پارامترهای مذکور اثبات نمود. *فرتون* و همکاران برش پلاسما را به‌صورت عددی و تجربی مورد بررسی قرار دادند[6]. در مدل ایجادشده، توزیع حرارت و توربولانس در شعله پلاسما مورد بررسی قرار گرفت. مطابق نتایج اعلام‌شده مهم‌ترین روش‌های انتقال حرارت در ذوب پلاسما به ترتیب هدایت، جابجایی و تشعشع هستند. *گوری* و همکاران در سال ۲۰۰۷ یک مدل غیرتعادلی برش پلاسما با اکسیژن ارائه دادند[8]. مدل ایجادشده، توزیع حرارت، سرعت، فشار، شدت جریان و چگالی فضاهای داخلی در مشعل پلاسما را به‌خوبی نمایش می‌دهد. *رادونویچ* و *مدیک* در سال ۲۰۱۱ برشکاری پلاسما را با شبکه‌های عصبی مصنوعی مدل نمود[14]. در مدل ایجادشده، شدت جریان، ضخامت ورق و سرعت پیشروی به عنوان پارامترهای ورودی و پارامتر زبری سطح برش داده‌شده به عنوان پارامتر خروجی درنظر گرفته شد. نتایج مدل نشان داد که شبکه عصبی قادر است نتایج را با دقت بالایی پیش‌بینی نماید.

فولاد ضدزنگ آستنیتی بیشترین استفاده را در بین انواع دیگر فولادهای ضدزنگ داشته و تقریباً ۸۰% بازار جهان را به خود اختصاص داده است. درساختار این نوع فولاد حداقل ۷% عنصر نیکل قرار دارد که ساختار فولاد را تماماً آستنیتی نموده و باعث می‌شود فولاد انعطاف‌پذیر، مقاوم در دماهای بالا، غیرمغناطیسی و دارای قابلیت جوشکاری مساعد باشد. فولادهای زنگ‌نزن را برای استفاده در محیط‌های مرطوب و خورنده، آب دریا و انواع مختلف محیط‌های شیمیایی انتخاب می‌کنند. به‌جز مقاومت در برابر محیط‌های خورنده خاص، فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI۳۰۹ دارای خواصی شامل: تبدیل آستنیت به مارتنزیت در اثر کار سرد، کاهش کربن و عنصرآلیاژی کُرُم برای حذف امکان تشکیل کاربید کُرُم و استفاده از درصدهای بالای عناصرآلیاژی کُرُم و نیکل برای افزایش استحکام در دمای بالا و مقاومت در برابر پوسته‌شدن است.

علی‌رغم انجام تحقیقات گسترده در زمینه برشکاری پلاسما، تاکنون تحقیقاتی روی برشکاری پلاسمای فولاد ضد زنگ AISI۳۰۹ انجام نگرفته و پارامترهای بهینه برای برش این فولاد پرکاربرد مشخص نشده است. هدف از این تحقیق بررسی پارامترهای مؤثر در فرآیند برشکاری پلاسمای فولاد ضد زنگ AISI۳۰۹ و بهینه‌سازی است. تأثیر پارامترهای ورودی شامل: شدت جریان، فشار گاز مصرفی و سرعت حرکت مشعل روی ۳ پارامتر خروجی اندازه عرض برش (kerf)، منطقه متأثر از حرارت (HAZ) و زبری سطح بررسی‌شده است. در نهایت با استفاده از الگوریتم ژنتیک، شرایط بهینه برای برشکاری استخراج شده است.

۲- تجهیزات و آزمایش‌های تجربی

با توجه به کاربرد گسترده فولاد ضد زنگ AISI۳۰۹، این آلیاژ برای انجام تست‌های برشکاری انتخاب گردید. بدین منظور روی ورق فولاد ضد زنگ AISI۳۰۹ تست‌های آنالیز مواد، سختی و کشش انجام گرفت. نتایج آزمایش‌های انجام‌شده در جدول ۱ آمده است.

به‌منظور بررسی اثر شرایط مختلف برشکاری روی پارامترهای خروجی، از طراحی آزمایش به روش کامل استفاده شده است. در این آزمایش‌ها اثر شدت جریان، فشار گاز مشعل و سرعت حرکت مشعل (نرخ پیشروی) مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به تحقیقات گذشته، این ۳ پارامتر بیشترین تأثیر را روی خروجی‌ها دارند[15, 16]. جدول ۲ سطوح مختلف درنظر گرفته‌شده برای هر پارامتر را نمایش می‌دهد. برای پارامترهای شدت جریان، سرعت حرکت مشعل و ولتاژ ۳ سطح درنظر گرفته شده است که گستره‌ای از کمترین تا بیشترین مقدار قابل انتخاب بر ماشین است. به این ترتیب تعداد ۲۷ آزمایش با شرایط گفته‌شده انجام شده است. هر آزمایش جهت افزایش دقت و حذف خطاهای احتمالی ۳ بار تکرار شده است. پارامترهای عرض شکاف، زبری سطح و منطقه متأثر از حرارت به عنوان خروجی درنظر گرفته شدند تا اثر پارامترهای ورودی درنظر گرفته‌شده روی آنها مشخص گردد.

جهت انجام آزمایشهای تجربی از یک دستگاه برش پلاسما مدل E150 شرکت گام الکتریک استفاده شده است. تنظیمات اولیه و کالیبراسیون دستگاه طی چندین تست اولیه انجام گرفت. در شکل ۱، یک نمونه برش اولیه ورق فولاد ضد زنگ AISI۳۰۹ نشان داده شده است.

جدول ۱) خواص مکانیکی فولاد ضد زنگ AISI۳۰۹

سختی (برینل)	ازدیاد طول (%)	مدول الاستیک (Gpa)	مدول برشی (Gpa)	استحکام تسلیم (Mpa)	استحکام کششی (Mpa)
۱۵۲	۴۲	۱۹۶	۷۵	۳۰۶	۶۰۷

جدول ۲) سطوح مختلف درنظر گرفته‌شده برای هر پارامتر

پارامتر	سطح			واحد
	۱	۲	۳	
شدت جریان (A)	۸۰	۱۰۵	۱۳۰	A
سرعت حرکت مشعل (V)	۲۵	۳۰	۳۵	mm/s
فشار گاز (P)	۳	۵	۷	bar



شکل ۱) برش پلاسما ورق فولاد ضد زنگ AISI۳۰۹

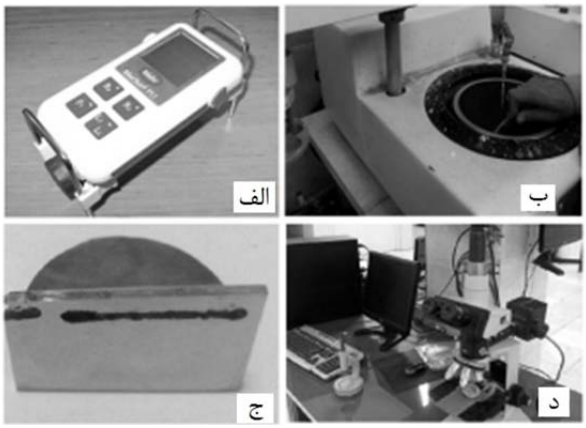
عرض شکاف ایجادشده یکی از مهم‌ترین پارامترهای خروجی در برش پلاسما است. جهت اندازه‌گیری عرض شکاف ایجادشده از یک کولیس دیجیتال استفاده شده است. عرض شکاف در ۵ مقطع (با فواصل ۲سانتی‌متر) از طول برش اندازه‌گیری گردیده و میانگین آنها ثبت شده است. جهت اندازه‌گیری زبری سطح لبه قطعات بعد از برشکاری، از یک دستگاه زبری‌سنج با مدل Mahr-PS1 استفاده شده است. دقت اندازه‌گیری زبری‌سنج مورد استفاده، ۰/۰۰۱µ m می‌باشد. جهت مشخص‌کردن زبری سطح قطعات از پارامتر Ra استفاده شده است. زبری هر قطعه ۳ بار اندازه‌گیری شده و میانگین آنها ثبت گردید.

ناحیه متأثر از حرارت قسمتی از مقطع برش‌خورده است که در آن، اگر چه فلز پایه ذوب نشده اما ساختار و دانه‌بندی آن در اثر حرارت ناشی از برشکاری و حرارت بسیار بالا، تغییر یافته است. در پایان

www.SID.ir

Archive of SID

فرآیندهای برشکاری به دلیل سرعت بالای سردشدن، در فولاد ضدزنگ AISI۳۰۹، ساختارهای مارتنزیتی تشکیل می‌گردد. این نواحی، مستعد ایجاد ترک در قطعه برشکاری‌شده هستند. بنابراین، بررسی عمق HAZ ایجادشده بسیار مفید و کاربردی است و با انجام کارهای لازم، از شکست و ترک‌خوردن قطعات برش‌خورده می‌توان جلوگیری کرد. جهت اندازه‌گیری HAZ در قطعات برش‌خورده، از میکرسکوپ دقیق و تجهیزات متالوگرافی استفاده شد. شکل ۲ تجهیزات مورد استفاده در آزمایش‌های تجربی را نشان می‌دهد.



شکل ۲) تجهیزات مورد استفاده در آزمایش‌های تجربی: (الف) دستگاه زبری‌سنج، (ب) پولیش‌زنی نمونه‌ها، (ج) نمونه پولیش‌زده‌شده، (د) میکروسکوپ متالوگرافی

۳- نتایج و بحث

با استفاده از نتایج آزمایش‌های تجربی و به‌کارگیری سیستم‌های نرم‌افزاری، یک شبکه عصبی- ژنتیک ایجاد شده و اثر پارامترهای مختلف بر خروجی‌های فرآیند بررسی شده است. با استفاده از الگوریتم ژنتیک برای آموزش شبکه عصبی، ۳ مدل با ساختار یک لایه پنهان، و تعداد ۹ نورون در لایه پنهان برای زبری سطح، تعداد ۱۱ نورون در لایه پنهان برای اندازه شکاف و تعداد ۱۲ نورون در لایه پنهان برای منطقه متأثر از حرارت برمبنای کمترین خطای آزمایش (MSE) انتخاب شد. تابع انتقال لایه پنهان تنسیگ و تابع انتقال لایه خروجی لگسیگ انتخاب شده است. از ۲۷ آزمایش انجام‌شده، نتایج ۲۴ آزمایش برای آموزش شبکه استفاده شد. از اطلاعات واردشده به نرم‌افزار، ۷۰% به فرآیند آموزش، ۱۵% به مرحله اعتبارسنجی و ۱۵% به انجام تست شبکه عصبی اختصاص یافته است. نتایج ۳ آزمایش از ۲۷ آزمایش انجام‌شده برای ارزیابی صحت شبکه استفاده شده است. در جدول ۳ مشخصات آموزش شبکه عصبی منتخب برای پیش‌بینی زبری سطح، اندازه شکاف و منطقه متأثر از حرارت توسط الگوریتم ژنتیک ارائه شده است. در نمودار ۱، مقایسه بین داده‌های تجربی و داده‌های پیش‌بینی‌شده شامل داده‌های آموزش و داده‌های تست برای زبری سطح صورت پذیرفته است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، اختلاف بین مقادیر تجربی و پیش‌بینی‌شده توسط شبکه عصبی در مجموعه داده‌های آموزش و تست ناچیز است و نمودارها از انطباق خوبی برخوردار هستند.

جدول ۳) آموزش شبکه عصبی منتخب برای پیش‌بینی زبری سطح، اندازه شکاف و منطقه متأثر از حرارت توسط الگوریتم ژنتیک

ANN Model	خطای داده‌های تست (%)	Ave testing Error (%)	Ave Training Error (%)	مقدار خطای آموزش (MSE)	تعداد تکرار GA	ساختار شبکه	تابع انتقال
Ra	۱/٦ ٦/۳ ٥/٦	۳/٥	۲/٤	۰/۰۰۰۴۸	۲۰۰	۳-۹-۱	Tan-Log
Kerf	٤/٦ ۲/۲ ٦/۱	۳/٦	۱/۹	۰/۰۰۰۳۰	۱٥۰	۳-۱۱-۱	Tan-Log
HAZ	٦/۱ ۳/۳ ٤/۹	۳/۸	۲/۷	۰/۰۰۰۷۶	۲٥۰	۳-۱۲-۱	Tan-Log



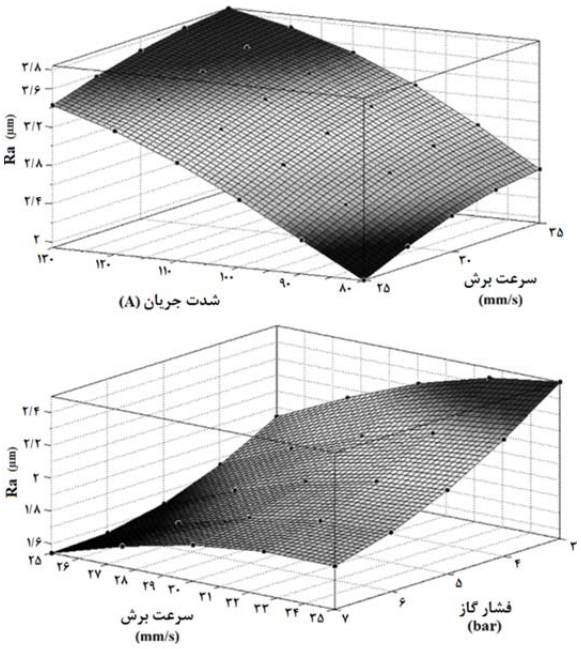
نمودار ۱) مقایسه بین داده‌های تجربی و داده‌های پیش‌بینی برای زبری سطح

در نمودار ۲ با استفاده از نمودارهای ۳بعدی به ترتیب تأثیر پارامترهای جریان و فشار گاز و همچنین تأثیر جریان و سرعت پیشروی روی زبری سطح بررسی شده است .بررسی نمودار ۲ نشان می‌دهد جریان بیشترین تأثیر و پس از آن سرعت بیشترین تأثیر را بر خروجی زبری سطح داشته است. با افزایش جریان، زبری با شیب بسیار زیادی افزایش یافته است. در توجیه این نتایج می‌توان گفت که با افزایش جریان، توان پلاسما ایجادشده بالاتر رفته و در نتیجه تلاطم در حوضچه مذاب افزایش می‌یابد که موجب افزایش زبری می‌گردد. تلاطم بیشتر در ناحیه مذاب موجب ایجاد ناهمواری‌های بزرگتر و در نتیجه افزایش قله‌ها و دره‌ها می‌گردد. همچنین با افزایش سرعت برش میزان زبری سطح افزایش یافته است. با این وجود شیب افزایش زبری با افزایش سرعت نسبت به شیب تغییر زبری با افزایش جریان کمتر بوده است. در سرعت‌های بالاتر اثر اکسیداسیون افزایش یافته و در نتیجه انرژی اعمال‌شده در جهت شعاعی بیشتر شده و موجب افزایش قله‌ها و دره‌ها در خطوط ناهمواری و در نتیجه افزایش زبری می‌شود. همچنین افزایش سرعت موجب می‌شود زمان کمتری برای خروج حوضچه مذاب ایجادشده توسط گاز وجود داشته باشد که موجب بجاماندن مذاب در دیواره‌ها و افزایش زبری می‌گردد.

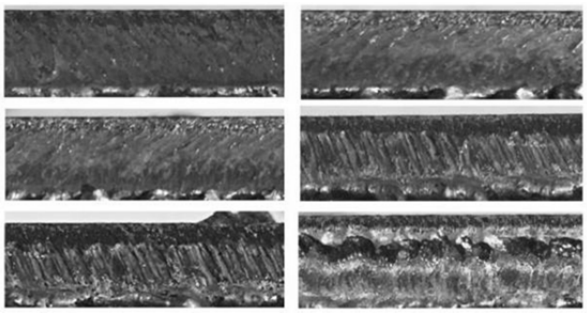
با افزایش فشار گاز، زبری سطح دیواره برش کاهش یافته است. اثر فشار گاز نسبت به سرعت و جریان بر زبری سطح بسیار کمتر بوده است. با افزایش فشار گاز، خروج حوضچه مذاب ایجادشده توسط پلاسما تسهیل شده و در نتیجه سطح ایجادشده بعد از برش کیفیت سطح بیشتری دارد. همچنین افزایش فشار گاز موجب کاهش سوختگی کناری دیواره‌ها و در نتیجه کاهش زبری می‌گردد. در شکل ۳ چند نمونه از سطح دیواره برش داده شده توسط برش پلاسما نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با انتخاب پارامترهای مختلف توپوگرافی سطح به شدت تغییر می‌کند.

www.SID.ir

Archive of SID



نمودار ۲) تأثیر پارامترهای جریان و فشار گاز و همچنین تأثیر جریان و سرعت پیشروی بر زبری سطح

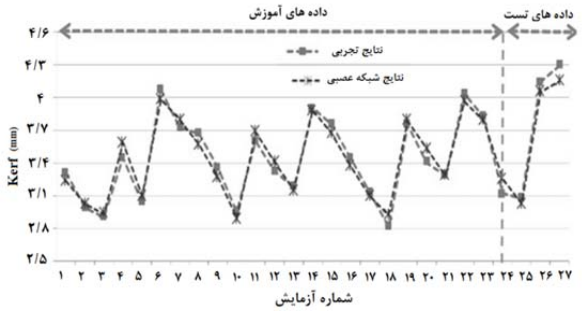


شکل ۳) چند نمونه از سطح دیواره برش در شرایط مختلف برش پلاسما

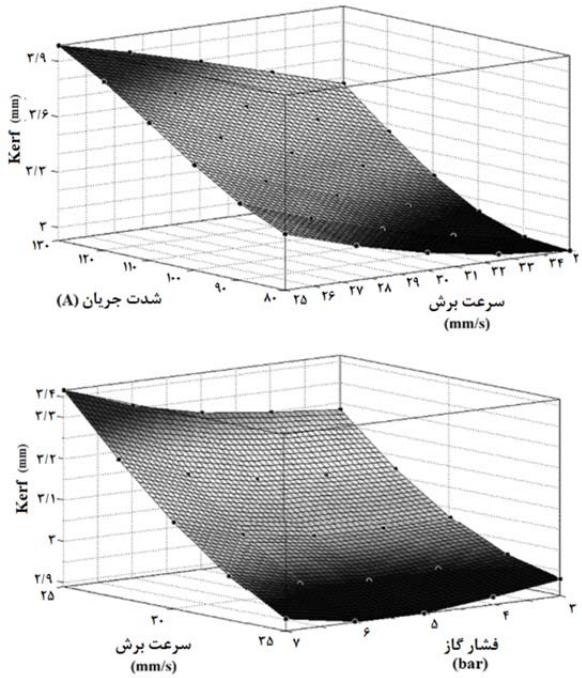
در نمودار ۳، مقایسه بین داده‌های تجربی و داده‌های پیش‌بینی‌شده شامل داده‌های آموزش و داده‌های تست برای اندازه شکاف صورت پذیرفته است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، اختلاف بین مقادیر تجربی و پیش‌بینی‌شده توسط شبکه عصبی در مجموعه داده‌های آموزش و تست ناچیز است و نمودارها از انطباق خوبی برخوردار هستند. این نتایج بیانگر آموزش صحیح و به اندازه شبکه عصبی توسط الگوریتم ژنتیک است.

در نمودار ۴ تأثیر پارامترهای جریان، سرعت پیشروی و فشار گاز بر اندازه شکاف نشان داده شده است. اندازه شکاف یکی از پارامترهای مهم برشکاری پلاسما است و کاهش آن موجب افزایش راندمان فرآیند و کاهش دورریز مواد می‌شود. بررسی نمودار ۴ نشان می‌دهد که شدت جریان، مؤثرترین عامل بر عرض برش است. با افزایش جریان، میزان انرژی وارده در واحد زمان در منطقه مذاب افزایش پیدا می‌کند و به‌دلیل افزایش میزان حرارت تولیدی، میزان اندازه شکاف نیز افزایش می‌یابد.

با توجه به نتایج، سرعت بعد از شدت جریان مؤثرترین عامل بر عرض برش است. با تغییر سرعت برش میزان انرژی وارده در واحد زمان در منطقه مذاب تغییر می‌کند. سرعت علاوه بر کنترل میزان توان ورودی به ورق موجب افزایش یا کاهش میزان گاز ورودی به مقطع شیار برش می‌گردد. با افزایش سرعت برش، میزان حرارت در منطقه مذاب کاهش پیدا می‌کند که موجب کاهش اندازه عرض برش می‌گردد. با افزایش فشار گاز، اندازه شکاف ابتدا کاهش و سپس افزایش داشته و تغییرات اندازه شکاف به‌صورت غیریکنواخت بوده است. این نتایج نشان می‌دهد که یک فشار گاز بهینه برای کاهش میزان اندازه شکاف وجود دارد.



نمودار ۳) مقایسه بین داده‌های تجربی و داده‌های پیش‌بینی برای اندازه شکاف



نمودار ۴) اثر جریان و سرعت پیشروی و اثر فشار گاز بر اندازه شکاف

در نمودار ۵ مقایسه بین داده‌های تجربی و داده‌های پیش‌بینی‌شده شامل داده‌های آموزش و داده‌های تست برای منطقه متأثر از حرارت صورت پذیرفته است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، اختلاف بین مقادیر تجربی و پیش‌بینی‌شده توسط شبکه عصبی در مجموعه داده‌های آموزش و تست ناچیز است و نمودارها از انطباق خوبی برخوردار هستند. این نتایج بیانگر آموزش صحیح و به اندازه شبکه عصبی توسط الگوریتم ژنتیک است.

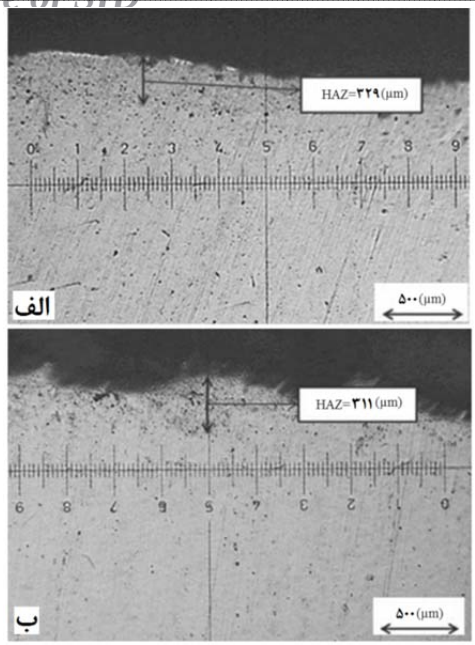
ناحیه متأثر از حرارت قسمتی از مقطع برش‌خورده است که در آن، اگرچه فلز پایه ذوب نشده است اما ساختار و دانه‌بندی آن در اثر حرارت ناشی از برشکاری و حرارت بسیار بالا، تغییر یافته است. در پایان فرآیندهای برشکاری به‌دلیل سرعت بالای سردشدن، ساختارهای مارتنزیتی تشکیل می‌گردد. این نواحی مستعد ایجاد ترک در قطعه برشکاری شده هستند.

در نمودار ۶ با استفاده از نمودارهای ۳بعدی، تأثیر پارامترهای جریان، سرعت پیشروی و فشار گاز بر HAZ بررسی شده است. تحلیل نمودار ۶ نشان می‌دهد جریان بیشترین تأثیر را بر عمق

www.SID.ir

Archive of SID

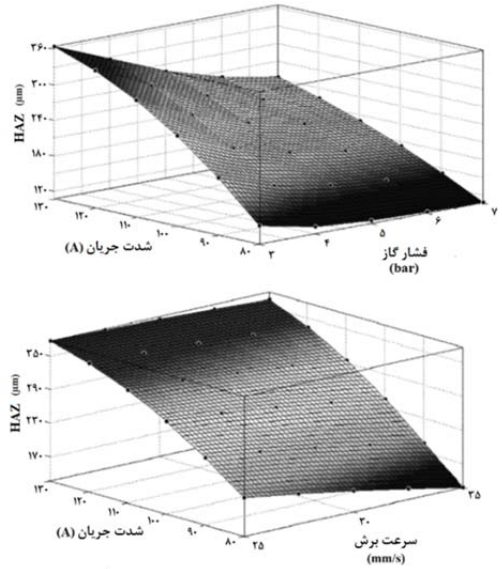
HAZ داشته و پس از آن، سرعت پیشروی بر این پارامتر خروجی مؤثر است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد با افزایش شدت جریان، HAZ با شیب بسیار زیادی افزایش یافته است. در توجیه این نتایج می‌توان گفت که با افزایش جریان، توان پلاسما ایجادشده بالاتر رفته و قوس پلاسما حرارت بیشتری یافته است و در نتیجه قسمت‌های بیشتری از ورق تحت تأثیر حرارت موضعی قرار گرفته که موجب افزایش عمق منطقه متأثر از حرارت شده است. همچنین با افزایش سرعت برش، میزان HAZ کاهش یافته است. با کاهش سرعت برش، میزان انرژی وارده به ورق در واحد زمان در منطقه مذاب کاهش پیدا می‌کند. سرعت علاوه بر کنترل میزان توان ورودی به ورق موجب افزایش یا کاهش میزان گاز ورودی به مقطع شیار برش می‌گردد. با افزایش سرعت برش، میزان حرارت در منطقه مذاب کاهش پیدا می‌کند که موجب کاهش اندازه HAZ می‌گردد. با افزایش فشار گاز عمق HAZ کاهش می‌یابد. با این وجود اثر فشار گاز روی HAZ نسبت به سرعت و شدت جریان بسیار کمتر بوده است. با افزایش فشار گاز، خروج حوضچه مذاب ایجادشده توسط پلاسما تسهیل شده و فرصت تبادل حرارت حوضچه مذاب با اطراف کاهش می‌یابد. همچنین افزایش فشار گاز می‌تواند اثر خنک‌کنندگی داشته باشد که موجب کاهش منطقه مؤثر از حرارت می‌گردد. نتایج به‌دست‌آمده در این تحقیق، با نتایج به‌دست‌آمده در تحقیقات قبلی در این زمینه هم‌خوانی دارد که نشانگر صحت انجام آزمایش‌های انجام‌شده و درستی نتایج است[6, 16]. در شکل ۴ دو نمونه از عمق ناحیه متأثر از حرارت در نمونه‌های برش‌خورده نشان داده شده است.



شکل ۴) دو نمونه از عمق ناحیه متأثر از حرارت در نمونه‌های برش‌خورده؛ (الف) سرعت ۲۵mm/s، فشار ۳بار و جریان ۱۳۰آمپر، (ب) سرعت ۳۰mm/s، فشار ۷بار و جریان ۸۰آمپر



نمودار ۵) مقایسه بین داده‌های تجربی و داده‌های پیش‌بینی برای منطقه متأثر از حرارت



نمودار ۶) اثر جریان، سرعت پیشروی و فشار گاز بر منطقه متأثر از حرارت

۳-۱- بهینه‌سازی خروجی‌های فرآیند

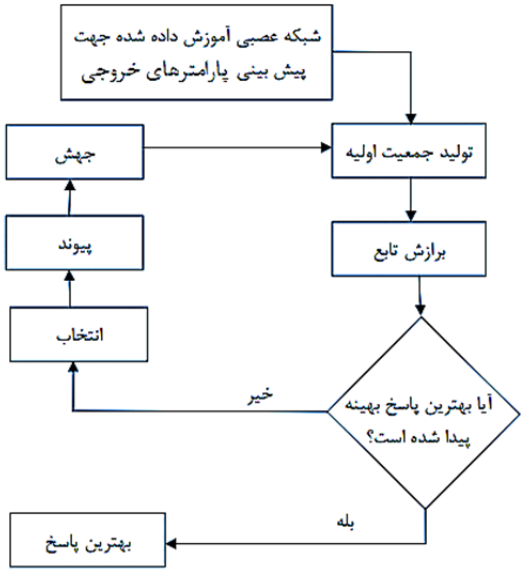
بهینه‌سازی پارامترهای خروجی جهت دستیابی به بهترین شرایط برشکاری توسط روش شبکه عصبی- الگوریتم ژنتیک انجام گرفت. ساختار کلی این روش در شکل ۵ نشان داده شده است. مدل شبکه عصبی به عنوان تابع هدف و زبری سطح، اندازه شکاف و منطقه متأثر از حرارت به عنوان متغییرهای ورودی الگوریتم ژنتیک معرفی شده‌اند. به عبارت دیگر، ورودی الگوریتم ژنتیک، ۳ مدل شبکه عصبی ایجادشده در قبل است که به عنوان تابع هدف درنظر گرفته می‌شوند. بهینه‌سازی براساس به حداقل‌رساندن ۳ پارامتر خروجی با توجه به پارامترهای ورودی فرآیند برشکاری پلاسما انجام گرفت. سایر متغیرهای الگوریتم ژنتیک شامل احتمال تلفیق و احتمال جهش به ترتیب ۰/۸ و ۰/۰۱ انتخاب و از عملگر انتخاب رقابتی به عنوان عملگر انتخاب در الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. نتایج بهینه‌سازی برای ۳ پارامتر خروجی برشکاری فولاد ضد زنگ AISI۳۰۹ در جدول ۴ نشان داده شده است. لازم به ذکر است، در آزمایش‌های انجام‌شده جهت ارزیابی پارامترهای بهینه‌شده، نزدیک‌ترین اعداد ممکن بر دستگاه برش پلاسما انتخاب شده است. به‌طور مثال، برای فشار گاز که در یک حالت بهینه، ۶/۷۷بار به‌دست آمده است، نزدیک‌ترین مقدار ممکن یعنی ۷بار روی ماشین تنظیم گردید. مقادیر بهینه برای Ra، Kerf و HAZ به ترتیب ۱/۵۴μm، ۳۰۰/۵۶μm و۲/۸۸mm به‌دست آمد که به ترتیب ۳/۱، ۹/۵ و ۵/۶% کمتر از میانگین نتایج تجربی به‌دست‌آمده در آزمایش‌ها بود. در جدول ۴ نتایج بهینه‌سازی برای ۳ پارامتر خروجی نشان داده شده است.

جدول ۴) نتایج بهینه برای Ra، Kerf و HAZ

پارامتر بهینه‌سازی	پارامترهای ورودی بهینه			خروجی بهینه
	جریان (A)	فشار (Bar)	سرعت (mm/s)	
زبری (μm)	۸۰	۶/۷۷	۲۵	۱/۵۴
هاز (μm)	۸۰	۴/۵۵	۳۵	۳۰۰/۵
کرف (mm)	۸۰	۵/۴۵	۳۵	۲/۸۸

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۵) ساختار کلی روش یک‌پارچه شبکه عصبی- الگوریتم ژنتیک جهت بهینه‌سازی

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی تجربی برشکاری با پلاسما روی فولاد ضد زنگ AISI۳۰۹ پرداخته شد. در ابتدا با بررسی پارامترهای مختلف، ۳ پارامتر سرعت برش، شدت جریان و فشار گاز به عنوان پارمترهای ورودی انتخاب شدند و اثر این ۳ پارامتر با انجام آزمایش‌های تجربی بر ۳ پارامتر خروجی یعنی اندازه شکاف (Kerf) و زبری سطح (Ra) و منطقه متأثر از حرارت (HAZ) مشخص گردید. پس از انجام آزمایش‌های تجربی، ۳ مدل شبکه عصبی که با الگوریتم ژنتیک آموزش داده شدند جهت پیش‌بینی اندازه شکاف، منطقه متأثر از حرارت و زبری سطح ایجاد شد. نتایج پیش‌بینی‌شده توسط شبکه عصبی نشان داد که الگوریتم ژنتیک روشی مناسب جهت آموزش شبکه‌های عصبی است و این شبکه‌ها می‌تواند با دقت بالایی آموزش ببیند و خروجی‌ها را به خوبی پیش‌بینی کند. نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق به‌صورت زیر خلاصه شده‌اند:

۱- در برشکاری پلاسما، شدت جریان و پس از آن، سرعت پیشروی بیشترین تأثیر را بر خروجی زبری سطح داشته است. اثر فشار گاز بر زبری سطح نسبت به سرعت و جریان بسیار کمتر بوده است.

۲- اندازه شکاف یکی از پارامترهای مهم برشکاری پلاسما است و کاهش آن موجب افزایش راندمان فرآیند و کاهش دورریز مواد می‌شود. تحلیل نتایج نشان می‌دهد که شدت جریان مؤثرترین عامل بر عرض برش است. با افزایش جریان به‌دلیل افزایش انرژی واردشده به منطقه برشکاری و میزان حرارت تولیدی، میزان اندازه شکاف افزایش می‌یابد. با افزایش سرعت برش، میزان حرارت در منطقه مذاب کاهش پیدا می‌کند و باعث کاهش اندازه عرض برش می‌گردد. با افزایش فشار گاز، اندازه شکاف ابتدا کاهش و سپس افزایش داشته است. این موضوع نشان می‌دهد که یک نقطه بهینه فشار گاز برای کاهش میزان اندازه شکاف وجود دارد.

۳- تحلیل نتایج تجربی به‌دست آمده نشان می‌دهد که همانند زبری سطح و اندازه عرض شکاف، شدت جریان بیشترین تأثیر را بر عمق منطقه متأثر از حرارت داشته است. در توجیه این نتایج می‌توان گفت که با افزایش جریان، توان پلاسما ایجادشده بالاتر رفته و قوس پلاسما حرارت بیشتری یافته است. در نتیجه قسمت‌های بیشتری از ورق تحت تأثیر حرارت موضعی قرار گرفته و موجب افزایش عمق منطقه متأثر از حرارت شده است. با افزایش فشار گاز، عمق منطقه متأثر از حرارت کاهش می‌یابد. اثر فشار گاز نسبت به سرعت و شدت جریان بر HAZ بسیار کمتر بوده است.

۴- بهینه‌سازی پارامترهای خروجی جهت دستیابی به بهترین شرایط برشکاری توسط روش شبکه عصبی- الگوریتم ژنتیک انجام گرفت. مدل شبکه عصبی به عنوان تابع هدف و زبری سطح، اندازه شکاف و منطقه متأثر از حرارت به عنوان متغییرهای ورودی الگوریتم ژنتیک معرفی شدند. مقادیر بهینه برای Ra، Kerf و HAZ به ترتیب ۱/۵۴μm، ۳۰۰/۵۶μm و ۲/۸۸mm به‌دست آمد که به ترتیب ۳/۱، ۹/۵ و ۵/۶% کمتر از میانگین نتایج تجربی به‌دست‌آمده در آزمایش‌ها بود.

تشکر و قدردانی: موردی توسط نویسندگان بیان نشد.
تأییدیه اخلاقی: موردی توسط نویسندگان بیان نشد.
تعارض منافع: موردی توسط نویسندگان بیان نشد.
سهم نویسندگان: سیدمصطفی میرعبداللهی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه‌پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰%)؛ محمدمهدی ابوترابی (نویسنده دوم)، روش‌شناس/پژوهشگر کمکی/نگارنده بحث (۵۰%)
منابع مالی: موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

منابع

1- Adamovich I, Baalrud SD, Bogaerts A, Bruggeman PJ, Cappelli M, Colombo V, et al. The 2017 plasma roadmap: Low temperature plasma science and technology. Journal of Physics D Applied Physics. 2017;50(32):323001.
2- Bidajwala RC, Trivedi MA, Gajera HM, Raol TS. Parametric optimization on plasma arc cutting machine for AISI 1018. International Journal of Advance Engineering and Research Development. 2015;2(5):548-555.
3- Bittencourt JA. Fundamentals of plasma physics. New York: Springer Science & Business Media; 2013.
4- Shi L, Song R, Tian X. Plasma beam radius compensation-integrated torch path planning for CNC pipe hole cutting with welding groove. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2017;88(5-8):1971-1981.
5- Das MK, Barman TK, Sahoo P, Kumar K. Process optimization in non-conventional processes: Experimentation with plasma arc cutting. In: Das R, Pradhan M, editors. Handbook of research on manufacturing process modeling and optimization strategies. Hershey PA: IGI Global; 2017. pp. 82-119.
6- Freton P, Gonzalez JJ, Gleizes A, Camy Peyret F, Caillibotte G, Delzenne M. Numerical and experimental study of a plasma cutting torch. Journal of Physics D Applied Physics. 2002;35(2):115.
7- Hoult AP, Pashby IR, Chan K. Fine plasma cutting of advanced aerospace materials. Journal of Materials Processing Technology. 1995;48(1-4):825-831.
8- Ghorui S, Heberlein JVR, Pfender E. Non-equilibrium modelling of an oxygen-plasma cutting torch. Journal of Physics D Applied Physics. 2007;40(7):1966.
9- Gariboldi E, Previtali B. High tolerance plasma arc cutting of commercially pure titanium. Journal of Materials Processing Technology. 2005;160(1):77-89.
10- Matsuyama K. Current status of high tolerance plasma arc cutting in Japan. Welding in the World Le Soudage dans le Monde. 1997;39(4):165-171.

www.SID.ir

Archive of SID

11- Ramakrishnan S, Shrinet V, Polivka FB, Kearney TN, Koltun P. Influence of gas composition on plasma arc cutting of mild steel. Journal of Physics D Applied Physics. 2000;33(18):2288.
12- Krajcarz D. Comparison metal water jet cutting with laser and plasma cutting. Procedia Engineering. 2014;69:838-843.
13- Chen JC, Li Y, Cox RA. Taguchi-based Six Sigma approach to optimize plasma cutting process: An industrial case study. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2009;41(7-8):760-769.
14- Radovanovic M, Madic M. Modeling the plasma arc cutting process using ANN. Nonconventional Technologies Review. 2011;4:43-48.
15- Ye W, Li Y, Wang F. Effects of nanocrystallization on the corrosion behavior of 309 stainless steel. Electrochimica Acta. 2006;51(21):4426-4432.
16- Maity KP, Bagal DK. Effect of process parameters on cut quality of stainless steel of plasma arc cutting using hybrid approach. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2015;78(1-4):161-175.

www.SID.ir