

بهینه سازی پارامترهای جوشکاری هیبریدی TIG-MIG فولاد زنگ‌زن آستنیتی 316 L

مجتبی استوار، توحید سعید^{*}، امیر مصطفی پور، سجاد امامی

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

(دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۱۲/۰۶؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۱/۲۶)

چکیده

در روش جوشکاری هیبریدی TIG-MIG کیفیت و راندمان بهتری در مقایسه با هر کدام از روشهای MIG و TIG به دست می آید. همچنین، در این روش هیبریدی، قوس MIG در محیط گاز محافظ آرگون خالص پایدارتر است. بنابراین، در این پژوهش اثر پارامترهای جوشکاری هیبریدی TIG-MIG بر کیفیت ظاهری و نسبت عمق به عرض جوش فولاد زنگ‌زن آستنیتی 316 L با طراحی آزمایش تاگوچی بررسی گردید. سپس ساختار ناحیه تحت تاثیر حرارت (HAZ) جوش هیبریدی حاصل از پارامترهای بهینه طراحی تاگوچی، با هر کدام از جوش های ساده MIG و TIG به تنهایی و تحت شرایط حرارت ورودی یکسان مقایسه شد. نتایج نشان داد که مهمترین پارامتر در روش هیبریدی از نظر دستیابی به بهترین کیفیت ظاهری و همچنین بیشترین نسبت عمق به عرض، فاصله بین دو قوس است. شدت جریان های TIG و MIG پارامترهای مؤثر بعدی هستند. در جوشکاری هیبریدی در پارامترهای بهینه، وسعت و اندازه دانه HAZ به دلیل سرعت سرمایش بالاتر آن نسبت به دو فرآیند MIG و TIG، کوچکتر بود.

کلمات کلیدی: فولاد زنگ‌زن آستنیتی، جوشکاری هیبریدی TIG-MIG، جوشکاری TIG، جوشکاری MIG.

Optimization of TIG-MIG hybrid welding of 316L austenitic stainless steel

M. Ostovar, T. Saeid^{*}, A. Mostafapour, S. Emami

Faculty of Materials Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran.

(Received 25 February 2018 ; Accepted 15 April 2018)

Abstract

In the TIG-MIG hybrid welding, higher weld efficiency and better weld quality are obtained with respect to each individual TIG and MIG welding methods. Moreover, in this method, the MIG arc is more stable in pure argon shielding gas. Therefore, in this study, the influence of TIG-MIG hybrid welding parameters on the welds appearance quality and welds depth to width ratio of a 316L austenitic stainless steel was investigated using optimum parameters of Taguchi design of experiments (DOE). Microstructure of the heat affected zone (HAZ) obtained from the hybrid welding was compared with those of each individual MIG and TIG welding techniques under equal heat-input condition. The results indicated that the most important parameter in the hybrid method to obtain the best appearance quality and the highest depth to width ratio is the distance between the two arcs. The MIG and TIG currents are the next influencing parameters. The width of HAZ and the size of constituent grains in hybrid welding with optimum parameter, were smaller than those of each individual TIG and MIG processes due to the higher associated cooling rate in the hybrid welding technique.

Keywords: Austenitic stainless steel, TIG-MIG hybrid welding, TIG welding, MIG welding.

^{*} نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: saeid@sut.ac.ir

1- مقدمه

روش‌های جوشکاری TIG و MIG از جمله مشهورترین روش‌های جوشکاری قوسی با گاز محافظ هستند که در زمینه‌های صنعتی مختلف کاربرد دارند. ولی هرکدام از این روش‌ها علاوه بر مزیت‌هایی که دارند دارای محدودیت‌هایی نیز هستند. TIG دارای کیفیت بالا ولی سرعت پایین جوشکاری است و MIG دارای راندمان بالا ولی کیفیت نسبتاً پایین‌تر است. از جمله سایر مشکلات MIG می‌توان به ناپایداری قوس آن در گاز محافظ آرگون خالص اشاره کرد که برای برطرف نمودن این مشکل در صنعت، از گازهای اکسیدکننده به صورت ترکیبی مانند $Ar+O_2$ یا $Ar+CO_2$ به عنوان گاز محافظ استفاده می‌شود. اما، حضور گازهای اکسیدکننده در گاز محافظ باعث اکسید شدن سطح جوش، افزایش میزان اکسیژن در جوش و افت خواص مکانیکی از جمله چقرمگی می‌شود. هدف روش‌های هیبریدی بهره‌مند شدن از مزایای هر روش و حذف محدودیت‌های آنان است. روش‌های نوینی مانند جوشکاری قوسی فلز گاز همراه با جریان برگشتی دوگانه¹ (DB-GMAW) [1]، جوشکاری قوسی دو طرفه² (DSAW)، جوشکاری قوسی دو طرفه با جریان برگشتی³ (BC-DSAW) [2]، جوشکاری قوسی گاز تنگستن با قوس دوگانه³ [3]، جوشکاری قوسی فلز گاز دوگانه⁴ [4]، جوشکاری قوسی هیبرید⁴ (TIG-MIG) [5] و غیره در این راستا گسترش یافته است. از طرفی مطالعات پیشین حاکی از آن است که روش هیبرید TIG-MIG می‌تواند بدون ایجاد عیوب ظاهری و حفظ کیفیت بالای جوش، سرعت جوشکاری را تا 4/5m/min برای فولاد نرم با ضخامت 2 mm افزایش دهد [6]. همچنین از این روش برای جوشکاری فلزات غیرهمجنس نیز می‌توان بهره گرفت [7]. در روش هیبرید TIG-MIG، بدلیل عبور جریانی مابین الکترود TIG و سیم جوش MIG، قوس MIG حتی در گاز محافظ آرگون خالص پایدار خواهد شد و مشکل افت خواص جوش که در بالا اشاره شد مرتفع می‌گردد که البته

لازمه آن بیشتر بودن جریان TIG از MIG است [5].

در مجموع، هدف از جوشکاری هیبریدی، رسیدن به کیفیت جوشکاری TIG و راندمان جوشکاری MIG می‌باشد. در این راستا پژوهش حاضر اثر پارامترهای جوشکاری هیبریدی TIG-MIG را بر ظاهر جوش و نسبت عمق به عرض آن به وسیله طراحی آزمایش تاگوچی بر روی فولاد زنگ‌زن آستنیتی L 316 بررسی می‌کند. در ادامه ساختار جوش هیبریدی با جوش‌های MIG و TIG در حرارت ورودی یکسان مقایسه می‌شود.

2- مواد و روش تحقیق

این پژوهش روی فولاد زنگ‌زن آستنیتی L 316 AISI با ابعاد 12 mm × 60 mm × 120 mm به روش جوشکاری هیبریدی TIG-MIG به صورت بدون درز با حرکت آغازین تورچ انجام گرفت. ابتدا نمونه روی میز متحرک با قابلیت تنظیم سرعت قرار گرفت و تورچ‌های MIG و TIG با فیکسچر در بالای نمونه و در فاصله و ارتفاع مشخص نسبت به هم و قطعه کار ثابت می‌چرخیدند. با حرکت میز، قطعه کار به صورت اتوماتیک مورد جوشکاری قرار گرفت. شکل (1) نمای کلی فرآیند را نشان می‌دهد. همچنین جدول (1) ترکیب شیمیایی فلز پایه و سیم جوش را ارائه می‌دهد. آرگون خالص بادبی 12 L/min به عنوان گاز محافظ برای MIG و TIG انتخاب شد. پارامترهای مؤثر بر جوشکاری هفت فاکتور مهم در نظر گرفته شد که عبارتند از: زاویه تورچ $MIG(\theta_M)$ ، مقدار کشیدگی سیم جوش $MIG(M_{we})$ ، شدت جریان $MIG(I_M)$ ، شدت جوش $TIG(I_T)$ ، ارتفاع قوس $TIG(h)$ ، زاویه تورچ $TIG(\theta_T)$ و فاصله بین دو قوس (d). هر فاکتور در سه سطح توسط طراحی آزمایش تاگوچی و استفاده از آرایه L 27 مورد بررسی قرار گرفت. جدول (2) مقدار پارامترهای جوشکاری را در سطوح مختلف مشخص می‌کند. به منظور بدست آوردن پارامترهای بهینه جوشکاری هیبریدی TIG-MIG، طراحی آزمایش تاگوچی با استفاده از آرایه L 27 و از طریق نرم‌افزار Minitab انجام گرفت. سپس کیفیت ظاهری و نسبت عمق به عرض تمامی

1- Dual bypass gas metal arc welding

2 - Double submerged arc welding

3 - Bypass current double side arc welding

4 - Tungsten inert gas - Metal inert gas

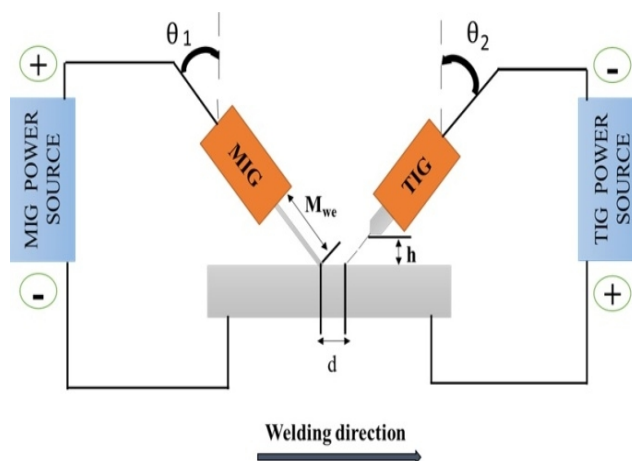
جدول ۱- ترکیب شیمیایی فلز پایه و سیم جوش.

Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Co	Cu	N	Fe
Base (316L)	0.03	0.5	1.43	0.01	0.006	17.30	2.16	10.24	0.22	0.41	0.024	Balance
Filler (ER 316L)	0.02	0.54	2.10	0.03	0.004	18.42	2.57	11.59	-	0.14	-	Balance

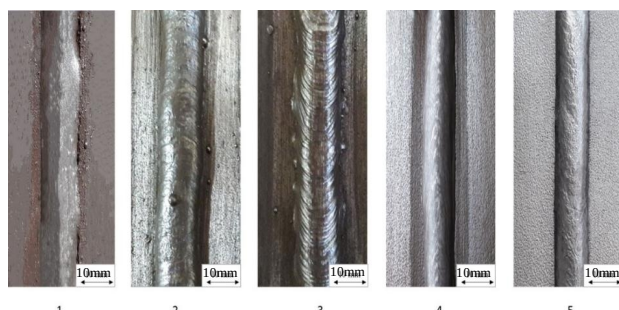
جدول ۲- فاکتورها و سطح ها در آزمایش متعامد.

Levels	Factors						
	$\theta_M(\text{deg})$	$M_{we}(\text{mm})$	$I_M(\text{A})$	$I_T(\text{A})$	$h(\text{mm})$	$\theta_T(\text{deg})$	$d(\text{mm})$
1	20	12	170	210	3	20	2
2	30	16	190	230	5	30	5
3	40	20	210	250	7	40	8

جریان و اختلاف پتانسیل یکسان ولی سرعت جوشکاری متفاوت مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. نمونه‌های جوش توسط وایرکات برش عرضی داده شد و جهت مشاهده ریزساختار بوسیله میکروسکوپ نوری، پس از سنباده‌زنی، در محلول $\text{H}_2\text{O}50\%\text{HNO}_3 + 50\%$ تحت جریان ۵ آمپر قرار گرفت و به مدت ۴۰ ثانیه الکتروپولیش و الکترواچ شدند. برای شناسایی فازهای فلز پایه از آنالیز تفرق اشعه ایکس (XRD) استفاده شد.



شکل ۱- نمای کلی فرآیند جوشکاری هیبریدی TIG-MIG.



شکل ۲- عدد کیفیت جوش در طراحی آزمایش تاگوچی.

3- نتایج و بحث

3-1- اثر پارامترهای جوشکاری بر کیفیت و هندسه جوش

با ثابت در نظر گرفتن دبی گاز محافظ برای MIG و TIG (1L/min)، پارامترهای مؤثر بر جوش در روش هیبریدی TIG-MIG از طریق طراحی آزمایش تاگوچی و استفاده از آرایه

نمونه‌های جوش ارزیابی شد. همچنین میزان تأثیر هر کدام از پارامترهای جوشکاری در سطوح مختلف بر کیفیت ظاهری و نسبت عمق به عرض جوش هیبریدی از طریق آنالیز روش تاگوچی مورد تحلیل قرار گرفت. ابتدا کیفیت ظاهری نمونه‌های جوش از نظر جمع شدگی گرده، بریدگی لبه جوش، پروفایل جوش و پاشش مورد ارزیابی قرار گرفت و به بهترین کیفیت عدد ۵ و بدترین کیفیت عدد ۱ نسبت داده شد.

شکل (۲) تصاویری از جوش با کیفیت‌های متفاوت را نشان می‌دهد. همچنین اندازه‌گیری نسبت عمق به عرض نمونه‌های جوش از طریق نرم‌افزار آنالیز تصویر (Image J) انجام گرفت. در ادامه، ساختار جوش هیبریدی در پارامترهای بهینه با جوش‌های ساده MIG و TIG در حرارت ورودی، شدت

جدول ۳- نتایج آنالیز طراحی آزمایش متعامد.

Experimental number	Factors							Quality	D/W
	θ_M (deg)	M_{we} (mm)	I_M (A)	I_T (A)	h (mm)	θ_T (deg)	d (mm)		
1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.12
2	1	1	1	1	2	2	2	4	0.17
3	1	1	1	1	3	3	3	1	0.15
4	1	1	2	2	1	1	1	1	0.13
5	1	2	2	2	2	2	2	4	0.18
6	1	2	2	2	3	3	3	1	0.16
7	1	3	3	3	1	1	1	2	0.19
8	1	3	3	3	2	2	2	5	0.23
9	1	3	3	3	3	3	3	4	0.22
10	2	1	2	3	1	2	3	1	0.21
11	2	1	2	3	2	3	1	1	0.15
12	2	1	2	3	3	1	2	4	0.20
13	2	2	3	1	1	2	3	2	0.18
14	2	2	3	1	2	3	1	2	0.13
15	2	2	3	1	3	1	2	3	0.18
16	2	3	1	2	1	2	3	2	0.17
17	2	3	1	2	2	3	1	1	0.11
18	2	3	1	2	3	1	2	3	0.16
19	3	1	3	2	1	3	2	3	0.20
20	3	1	3	2	2	1	3	1	0.18
21	3	1	3	2	3	2	1	2	0.14
22	3	2	1	3	1	3	2	3	0.21
23	3	2	1	3	2	1	3	2	0.18
24	3	2	1	3	3	2	1	1	0.14
25	3	3	2	1	1	3	2	2	0.17
26	3	3	2	1	2	1	3	1	0.15
27	3	3	2	1	3	2	1	1	0.11

Influence on weld appearance $d > I_M > I_T > \theta_M > \theta_T > M_{we} > h$
 Influence on depth to width ration $d > I_T > I_M > h > \theta_T > \theta_M > M_{we}$

Optimized factor 1 3 3 3 2 2 2
 Optimized parameters $d = 5 \text{ mm}$, $I = 5 \text{ mm}$, $I_M = 210 \text{ A}$, $I_T = 250 \text{ A}$, $\theta_M = 20^\circ$, $\theta_T = 30^\circ$, $M_{we} = 20 \text{ m}$

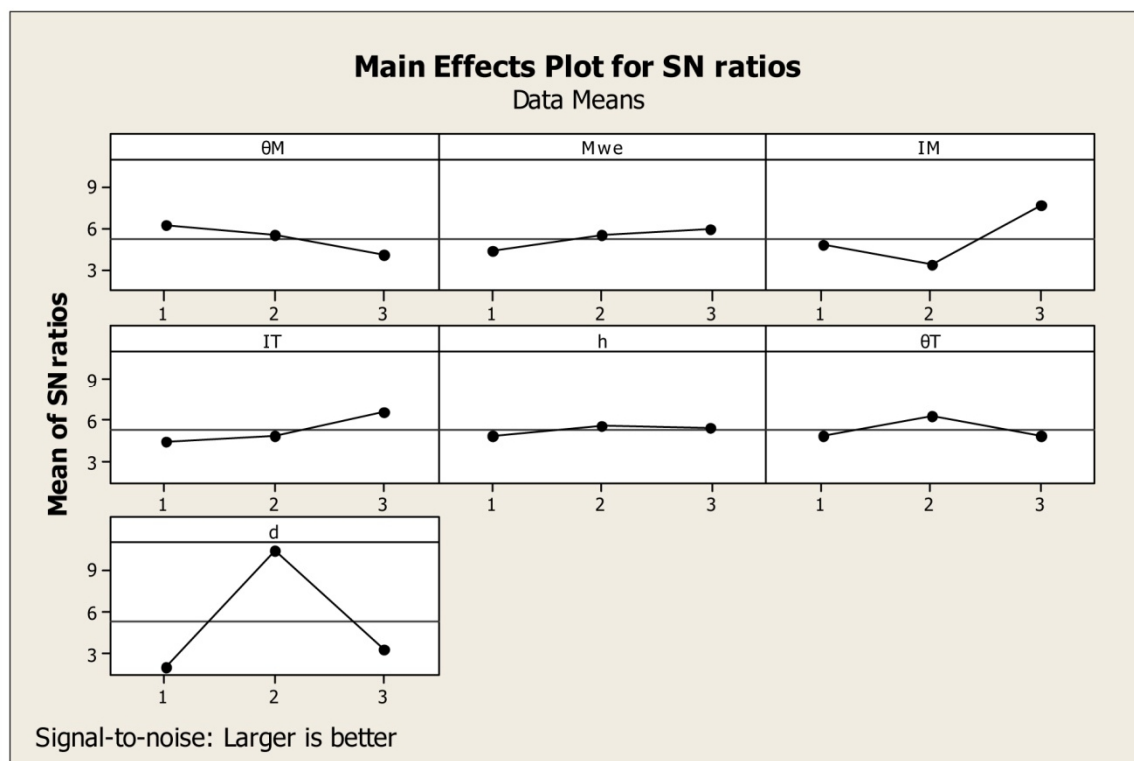
محدوده این نسبت برای یک پارامتر بیشتر است، نشانه حساس بودن نتیجه آزمایش به تغییر سطوح آن پارامتر بوده و پارامتر مربوطه اثر بیشتری نسبت به سایر پارامترها بر نتیجه آزمایش دارد. نسبت سیگنال به نویز، نشان دهنده حساسیت مشخصه کیفی مورد بررسی به فاکتورهای خارجی اثرگذار و غیر قابل کنترل در یک فرآیند کنترل شده است. در روش تاگوچی از این مفهوم برای بدست آوردن شرایط بهینه در آزمایشها استفاده می شود.

در هر آزمایش، هدف یافتن بالاترین نسبت S/N در نتایج است. مقدار S/N بالا نشان دهنده این است که اثر پارامترهای قابل کنترل بیشتر از اثر پارامترهای غیر قابل کنترل و یا پارامترهای اغتشاشی است. طراحی فرآیند تولید با بالاترین نسبت S/N همواره باعث ایجاد بهترین کیفیت با حداقل واریانس می شود. نمودار نسبت S/N مربوط به اثر هر کدام از سطوح و پارامترهای جوشکاری بر کیفیت ظاهری جوش در شکل (۳) مشاهده می شود. مطابق شکل (۳)، مهم ترین پارامتر که دارای بیشترین محدوده نسبت S/N است، فاصله بین سیم جوش

L۲۷ مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه آزمایش و پارامترهای بهینه در جدول (۳) مشاهده می شود. نتایج نشان داد که از نظر کیفیت ظاهری جوش، به ترتیب، فاصله بین دو قوس، جریان MIG و جریان TIG دارای بیشترین تأثیرات هستند. مقدار پارامترهای بهینه، منطبق بر پارامترهای نمونه جوش شماره ۸ هستند و این جوش تنها نمونه ای است که دارای کیفیت ظاهری ۵ است. از نظر کیفیت نسبت عمق به عرض جوش، به ترتیب، فاصله بین دو قوس، جریان TIG و جریان MIG پارامترهای مهم و تأثیرگذار بعدی هستند. نمونه جوش شماره ۸ دارای بیشترین نسبت عمق به عرض است. این در حالی است که این نمونه بهترین کیفیت ظاهری را نیز داشت.

3-2- تحلیل نتایج حاصل از کیفیت ظاهری نمونه های جوش

آنالیز طراحی تاگوچی بر اساس نسبت سیگنال به نویز (S/N) تنظیم شده است به طوری که هرچه مقدار آن برای یک سطح از یک پارامتر بیشتر باشد نشانه اهمیت بیشتر و بهینه بودن آن سطح نسبت به سایر سطوح آن پارامتر است. همچنین وقتی



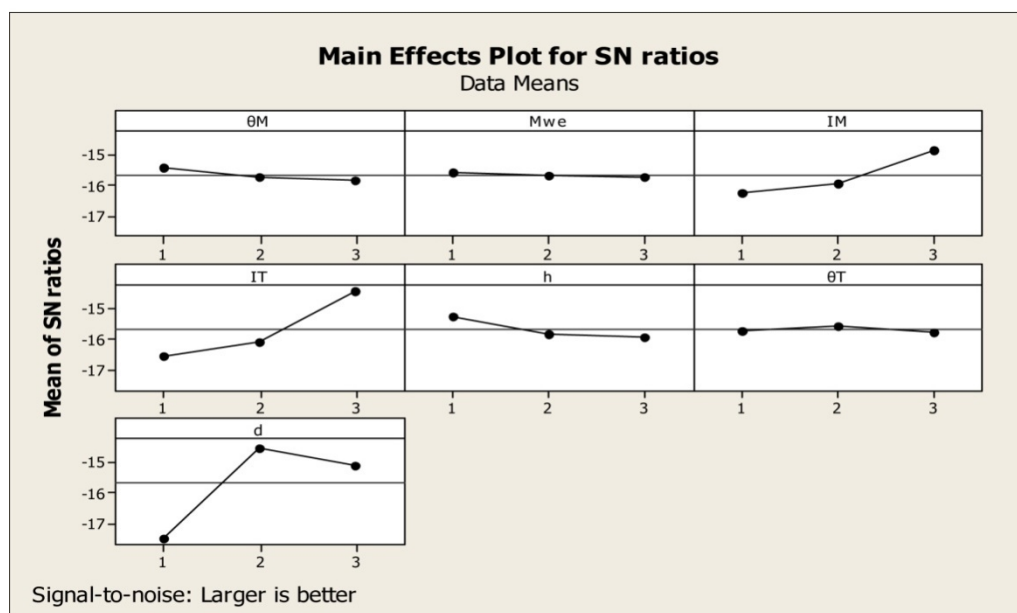
شکل ۳- نمودار میانگین نسبت سیگنال به نویز برای کیفیت ظاهری نمونه های جوش در آزمایش متعامد L27

مقدار پارامترهای بهینه، منطبق بر پارامترهای نمونه جوش شماره ۸ هستند و این جوش تنها نمونه ای است که دارای کیفیت ظاهری ۵ است. بنابراین این جوش به عنوان جوش بهینه با پارامترهای بهینه انتخاب شد.

3-3- تحلیل نتایج حاصل از نسبت عمق به عرض نمونه های جوش

نسبت عمق به عرض تمام نمونه های جوش در آزمایش متعامد L27 محاسبه شد. نمودار نسبت S/N مربوط به اثر هر کدام از سطوح و پارامترهای جوشکاری بر نسبت عمق به عرض جوش در شکل (۴) مشاهده می شود. مطابق شکل (۴)، مهمترین پارامتر با بیشترین دامنه نسبت S/N، فاصله بین سیم و الکتروود (d) می باشد. با تغییر سطح در این پارامتر، نسبت عمق به عرض دچار تغییر خیلی زیادی می شود و سطح دوم این پارامتر با بیشترین نسبت S/N سطح بهینه آن است. جریان TIG و جریان MIG پارامترهای مهم و تأثیرگذار بعدی هستند. نمونه جوش شماره ۸ دارای بیشترین نسبت عمق به عرض است.

و الکتروود (d) است. با تغییر این فاصله از سطح بهینه خود که سطح دوم (مقدار ۵mm) با بیشترین نسبت S/N است به سطوح دیگر، افت شدیدی در کیفیت ظاهری جوش ایجاد شده و نسبت S/N به شدت کاهش می یابد. جریان MIG و جریان TIG پارامترهای مهم بعدی با بیشترین دامنه نسبت S/N هستند و بنابراین بیشترین تأثیر را بر کیفیت ظاهری جوش می گذارند. کمترین اثر بر کیفیت ظاهری جوش مربوط به ارتفاع قوس است. این ارتفاع اثر قابل توجهی بر مقدار جریان عبوری بین الکتروود تنگستنی و سیم جوش MIG ندارد. مقدار کشیدگی سیم جوش MIG، اثر بیشتری بر کیفیت ظاهری جوش نسبت به ارتفاع قوس TIG دارد، ولی نسبت به پارامترهای دیگر، این اثر قابل ملاحظه نیست. برای مشخص کردن پارامترهای بهینه جوشکاری، به عنوان مثال زاویه تورچ MIG در سطح اول دارای بیشترین نسبت S/N است، بنابراین این سطح به عنوان مقدار بهینه برای این پارامتر در نظر گرفته می شود و به روش مشابه مقدار بهینه ی پارامترهای دیگر برای رسیدن به بالاترین کیفیت ظاهری جوش هیبریدی انتخاب می شوند.



شکل ۴- نمودار میانگین نسبت سیگنال به نویز برای نسبت عمق به عرض نمونه های جوش در آزمایش متعامد L_{27}

میانگین نسبت عمق به عرض جوش برای نمونه های با کیفیت ۴ بیشتر از این مقدار میانگین برای نمونه های با کیفیت ۳ و همچنین نمونه های با کیفیت پایین تر است. چنین روندی برای بقیه موارد نیز صادق است. بنابراین می توان به قابل اعتماد بودن طراحی آزمایش تاگوچی و همچنین نتایج حاصل از این پژوهش برای روش نوین جوشکاری هیبریدی MIG-TIG استناد کرد.

3-4- اثر فاصله بین دو قوس

وقتی فاصله بین دو قوس زیاد است (۸ mm)، قوس TIG فقط به عنوان یک منبع ذوب فلز پایه عمل کرد و نمی تواند قوس MIG را پایدار نماید و همچنین اثری بر ذوب سیم جوش MIG ندارد. وقتی فاصله بین دو قوس کم است (۳ mm)، به دلیل اثر مداخله زیادی دو قوس در همدیگر بازهم پایداری قوس MIG اتفاق نمی افتد. از طرف دیگر، قوس TIG در ذوب کردن فیلر MIG نقش زیادی دارد و عیوبی چون سوختگی کناره جوش در بیشتر مواقع رخ می دهد. وقتی فاصله بین دو قوس مناسب است (۵ mm)، قوس MIG پایدار می شود که می تواند به دلیل عبور جریان مناسبی مابین الکترود TIG و سیم جوش MIG باشد. همچنین قوس TIG نقش مناسبی در ذوب

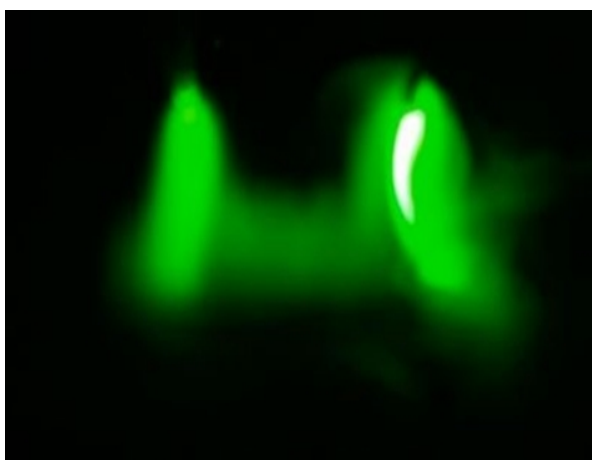
این در حالی است که این نمونه بهترین کیفیت ظاهری را نیز داشت. مطابق شکل (۴)، پارامترهای بهینه جوشکاری هیبریدی از نظر نسبت عمق به عرض، بجز در دو مورد منطبق بر پارامترهای نمونه جوش شماره ۸ است. این دو مورد عبارتند از: مقدار کشیدگی سیم جوش Mwe (MIG) و ارتفاع قوس TIG (HT). پارامتر مقدار کشیدگی سیم جوش Mwe (MIG) دارای کمترین اثر بر نسبت عمق به عرض است. به دلیل دامنه خیلی کوچک نسبت S/N، تغییر در سطوح این پارامتر اثر قابل ملاحظه ای را بر نتیجه کار نخواهد داشت. در مورد ارتفاع قوس TIG (IT) می توان گفت هرچه ارتفاع قوس کمتر باشد نسبت عمق به عرض جوش افزایش می یابد.

مطابق شکل (۴)، وقتی ارتفاع قوس TIG از ۳ mm به ۵ mm تغییر کند، کاهش نسبت عمق به عرض بیشتر از حالتی است که ارتفاع قوس از ۵ mm به ۷ mm تغییر یابد. کاهش ارتفاع قوس TIG اگرچه باعث افزایش نسبت عمق به عرض می شود ولی مطابق شکل (۳)، باعث کاهش کیفیت ظاهری جوش نیز خواهد شد. در این پژوهش چون هر دو ویژگی کیفیت ظاهری و نسبت عمق به عرض جوش مد نظر است، بنابراین پارامترهای نمونه جوش شماره ۸ به عنوان پارامترهای بهینه طراحی آزمایش انتخاب شد.

جدول ۴- پارامترهای جوش مقایسه‌ای و گزارش هندسه حوضچه جوش.

Welding Parameters	H ₁		H ₂		MIG ₁	MIG ₂	TIG
	MIG	TIG	MIG	TIG			
Current (A)	210	250	210	250	210	210	250
Voltage (V)	31.2	19	31.2	19	31.2	49	19
Shielding gas flow (L/min)	12	12	0	12	12	12	12
Welding speed (cm/min)	25		25		16	25	11.65
Heat input (kJ/cm)	17.304		17.304		17.2	17.287	17.124
Depth (mm)	2.45		3		1.81	3.08	1.94
Width (mm)	10.64		13.6		15.03	20.17	16.82
Depth/Width	0.23		0.22		0.12	0.15	0.12
HAZ width (mm)	2.33		2.58		3.53	3.41	3.59

جوشکاری هیبریدی، می‌تواند باعث توزیع دمائی مناسب در پلازما و حوضچه جوش شده و نسبت عمق به عرض را افزایش دهد همچنین به دلیل اثر قوس TIG بر پایداری قوس MIG این نسبت افزایش می‌یابد. این نسبت برای MIG2 به مقدار ۲۵٪ نسبت به MIG1 افزایش داشته که دلیل آن اثر همزمان افزایش ولتاژ و سرعت جوشکاری بر روی این نسبت می‌باشد. در جوش H2 با کاهش گاز محافظ جوش هیبریدی، نسبت عمق به عرض جوش به مقدار جزئی کاهش داشته است.



شکل ۶- شکل قوس در فاصله بهینه بین سیم جوش و الکترود
(A=250 A, IT= 210 IM)

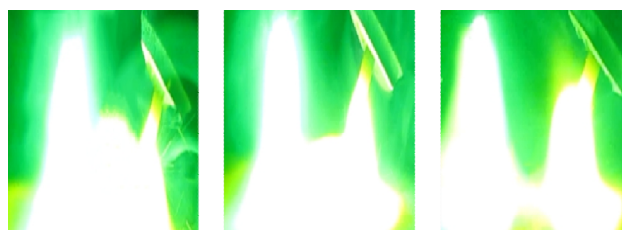
3-6- ریزساختار

شکل (۸)، ریزساختار نواحی مختلف جوش هیبریدی H1 را مشخص می‌کند. ریزساختار فلز پایه از دانه‌های آستنیت هم‌محور زمینه و فاز سیاه رنگ تشکیل شده که مطابق نتایج حاصل از آنالیز XRD (شکل ۹) مربوط به فاز فریت است. در ناحیه تحت تاثیر حرارت (HAZ) فاز سیاه رنگ فریت در اثر چرخه حرارتی جوش تقریباً از بین رفت و با وجود این،

فلز پایه و سیم جوش MIG ایفا کرده و بیشتر عیوب جوشکاری حذف می‌شوند.

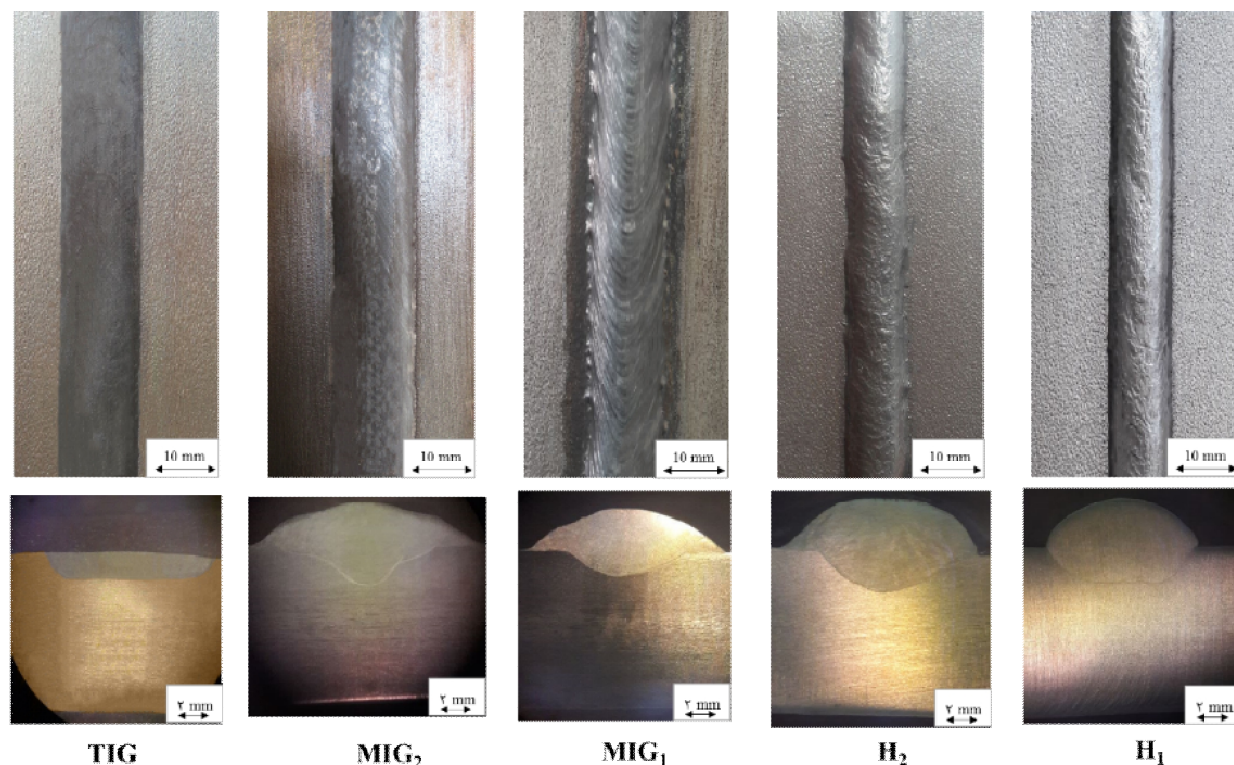
3-5- درشت ساختار

در این بخش به بررسی و مقایسه ۵ جوش در حرارت ورودی یکسان مطابق جدول (۴) پرداخته می‌شود. برای جوش‌های هیبریدی (H1 و H2) پارامترهای بهینه‌ای که در طراحی آزمایش تاگوچی بدست آمد انتخاب شد، با این تفاوت که در جوش هیبرید H2 گاز محافظ MIG حذف شده است. برای جوش‌های TIG و MIG1 جریان و ولتاژ مشابه جوش هیبریدی و سرعت جوشکاری با هدف یکسان بودن حرارت ورودی با جوش هیبریدی انتخاب شده است. در مورد جوش MIG2 جریان و سرعت جوشکاری مشابه با جوش هیبریدی و ولتاژ به منظور حرارت ورودی یکسان با جوش هیبریدی انتخاب شده است. شکل (۵) تصاویر مربوط به ظاهر جوش‌ها و سطح مقطع آن‌ها را نمایش می‌دهد.



شکل ۵- شکل قوس در فاصله های مختلف بین سیم جوش و الکترود در جوش هیبریدی (A=250 A, IT=210 IM).

ملاحظه می‌شود که در حرارت ورودی یکسان، نسبت عمق به عرض جوش H1 به مقدار ۹۰٪ نسبت به MIG1 و TIG و نیز ۵۰٪ نسبت به MIG2 افزایش داشته است. وجود دو قوس در



شکل ۷- شکل ماکرو از نمونه های جوش با شرایط ذکر شده در جدول ۴.

کمتر از جوش های دیگر است.

در جدول (۴) عرض ناحیه HAZ جوش های مختلف نشان داده شده است. در سال ۱۹۵۷ فرمول زیر برای رشد دانه در شرایط ایزوترمال پیشنهاد شد [۸].

$$D_f^n - D_0^n = A [\exp(-Q/RT)] (t_1 - t_2) \quad (1)$$

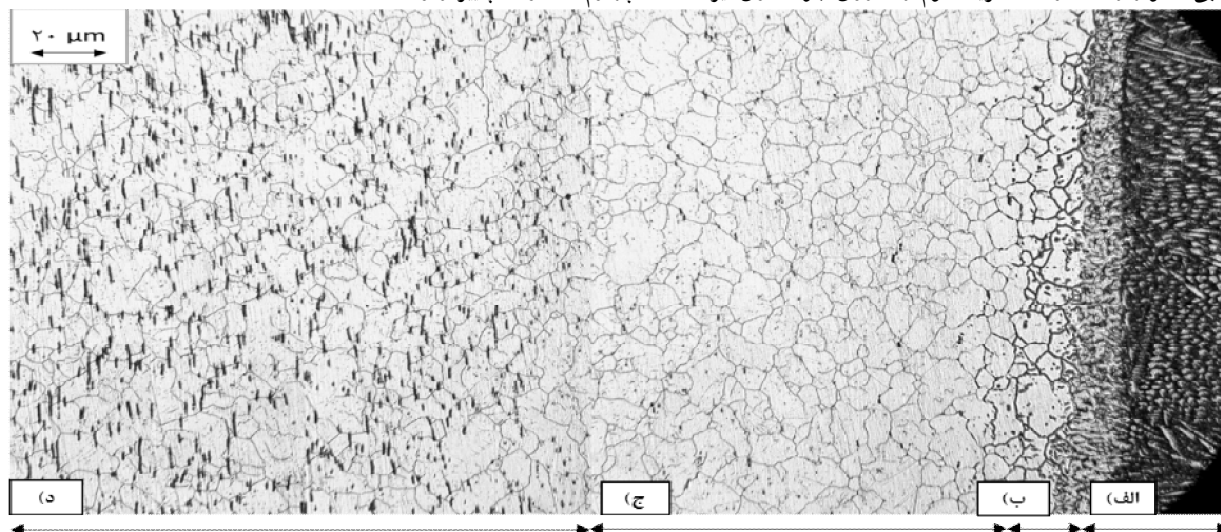
که D_f اندازه دانه بعد از رشد بعد از نگهداری در دمای T و در بازه زمانی t_1 تا t_2 ، D_0 اندازه دانه اولیه، n توان رشد، Q انرژی فعال سازی، R ثابت گازها و A ثابت فلز هستند. مطابق با فرمول بالا وقتی پیک دمایی و زمان ماندگاری در آن دما همزمان کاهش یابد اندازه دانه کاهش می یابد. در جوش های هیبریدی با دو قوس، حرارت به طور وسیع تری پخش می شود و باعث کاهش پیک دمایی و کاهش زمان ماندگاری در آن دما نسبت به جوش های با یک قوس می شود [۹]. این امر سبب افزایش سرعت سرمایش و کاهش وسعت و اندازه دانه ناحیه HAZ در جوش هیبریدی می گردد.

تحقیقی که در سال ۲۰۱۴ روی فولاد نرم انجام گرفت، نشان داد که اندازه دانه و وسعت ناحیه HAZ برای جوشکاری

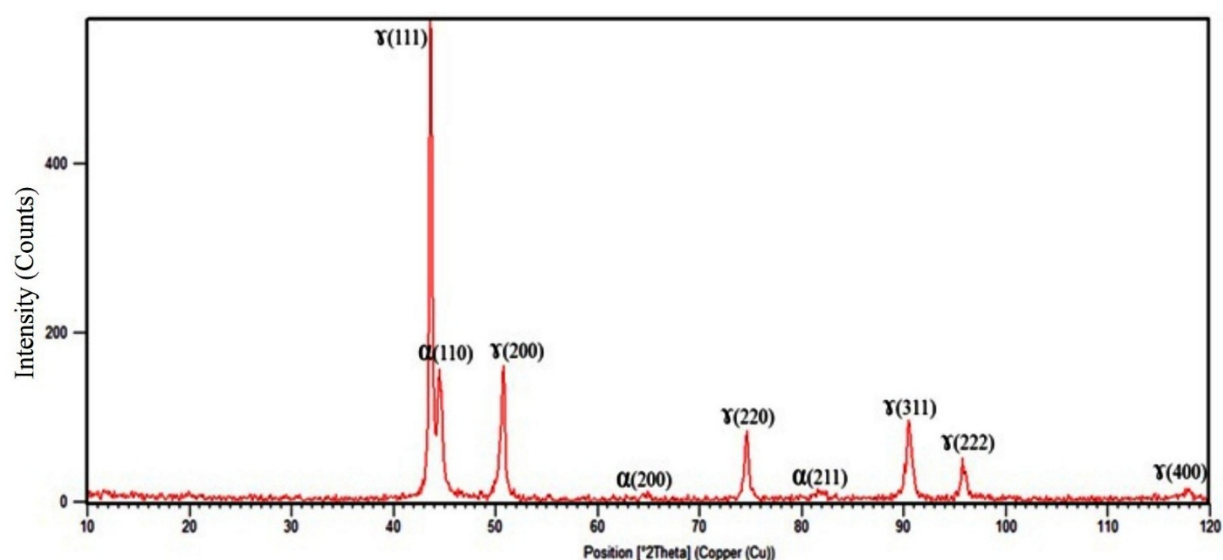
متوسط اندازه دانه نسبت به فلز پایه تغییر نداشته است. در ناحیه ذوب جزئی^۱ (PMZ) مرز دانه های فلز پایه بصورت جزئی ذوب می شود و در دمای بالا ساختاری خمیری بوجود می آید. با توجه به ترکیب شیمیایی فلز پایه و سیم جوش، انجماد در حوضچه مذاب با جوانه های فریت اولیه شروع می شود و با سرد شدن ناحیه، استحاله فریت به آستنیت اتفاق می افتد. به همین دلیل ساختار فلز جوش در شکل (۸)، از دندریتهای سیاه رنگ فریت و آستنیت سفید رنگ بین دندریتی تشکیل شده است.

در شکل (۱۰)، ناحیه تحت تأثیر حرارت و فلز پایه برای جوش MIG2 نشان داده شده است. مطابق شکل (۱۰)، در ناحیه HAZ درشت شدن دانه ها مشخص است به طوری که از حوضچه جوش به سمت فلز پایه اندازه دانه ها کوچکتر می شود. شکل (۱۱)، ریزساختار ناحیه HAZ جوش های مختلف این پژوهش را با همدیگر مقایسه کرده است. نکته قابل توجه در این تصاویر میکروسکوپ نوری این است که در جوش های هیبریدی H1 و H2 (شکل ۱۱-الف و ۱۱-ب)، وسعت و اندازه دانه ناحیه HAZ

1 - Partially melted zone



شکل ۸- ریزساختار نواحی مختلف جوش هیبریدی H1: الف) حوضچه مذاب، ب) ناحیه PMZ، ج) ناحیه HAZ و د) فلز پایه.



شکل ۹- آنالیز XRD برای فولاد زنگ نزن آستنیتی L ۳۱۶ پایه.

بیشترین نسبت عمق به عرض جوش، فاصله بین دو قوس است. بطوری که در پارامترهای بهینه هر دو مورد به بیشترین مقدار خود رسیدند. شدت جریان های TIG و MIG پارامترهای مؤثر بعدی هستند.

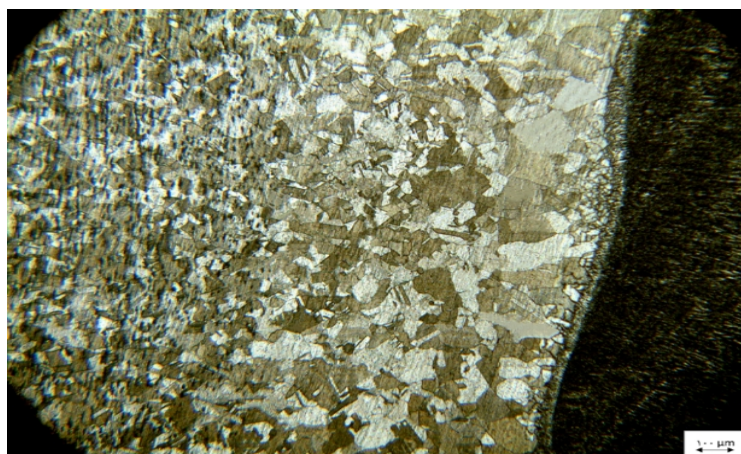
در حرارت ورودی یکسان، نسبت عمق به عرض جوش H1 به مقدار ۹۰٪ نسبت به MIG1 و TIG و نیز ۵۰٪ نسبت به MIG2 افزایش داشته است.

جوش هیبریدی TIG-MIG دارای اندازه دانه و پهنای ناحیه HAZ کوچکتر در مقایسه با جوش های TIG

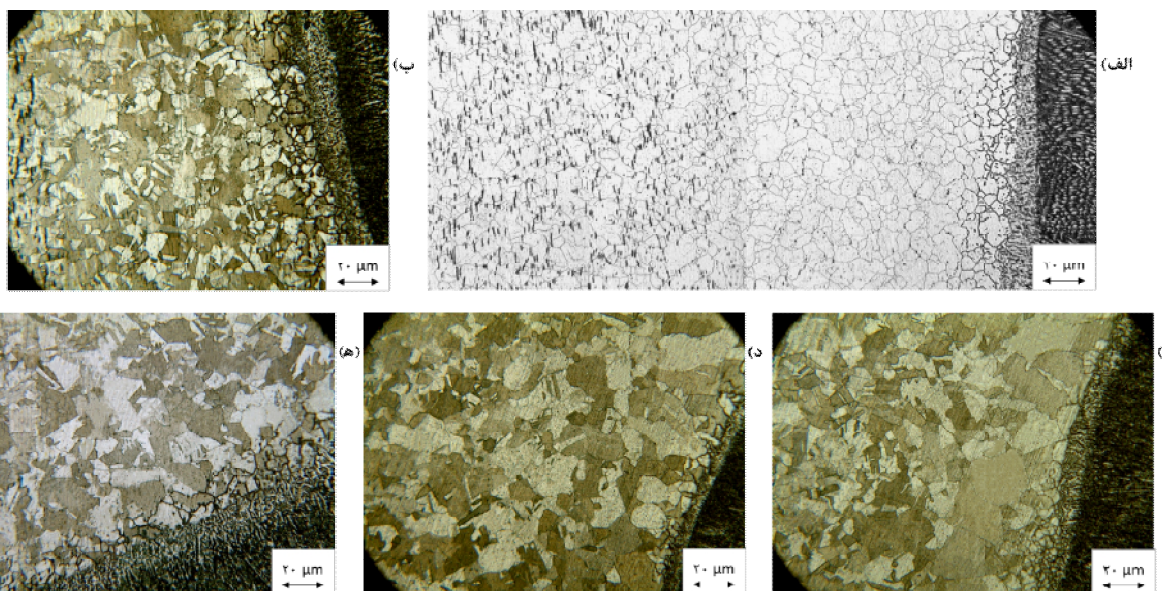
هیبریدی MAG-TIG کمتر از جوشکاری MAG در حرارت ورودی یکسان است [۶]. به دلیل سرعت سرمایش مشابه در جوش های MIG1، MIG2 و TIG تحت حرارت ورودی یکسان، اندازه دانه و وسعت ناحیه HAZ در این جوش ها مشابه هم است.

۴- نتیجه گیری

مهمترین پارامتر در روش هیبرید TIG-MIG فولاد زنگ نزن آستنیتی L ۳۱۶، از نظر دستیابی به بهترین کیفیت ظاهری و



شکل ۱۰- درشت شدن دانه ها در ناحیه HAZ برای جوش MIG2.



شکل ۱۱- ریزساختار ناحیه HAZ: (الف) H2، (ب) H2، (ج) MIG1، (د) MIG2 و (ه) TIG.

و MIG است.

منابع

DevendranathRamkumar, K. Arivazhagan, N. Narayanan, S. "Assessment of Mechanical Properties of AISI 4140 and AISI 316 Dissimilar Weldments", *Procedia Engineering*, Vol. 75, pp. 29-33, 2014.

5- Tseng, K.H., Shiu, Y.J, Effect of thermal stability of powdered oxide on joint penetration and metallurgical feature of AISI 4130 steel TIG weldment, *Powder Technology*, Vol. 286, pp. 31-38, 2015.

[۶] اکرامی، ع. سیدریحانی، م، ساختار، خواص و کاربرد آلیاژهای مهندسی، دانشگاه صنعتی شریف-مرکز انتشارات، ۱۳۹۰.

7-SouzaFilho, I.R.,Zilnyk, K.D,Sandim, M.J., Bolmaro, R.R.E., Sandim, H.R.Z., Strain partitioning and texture evolution during cold rolling of AISI 201 austenitic stainless steel, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 702, pp. 161-172, 2017.

8- Jang, C. Lee, J. Kim, J. S. Jin, T. E. "Mechanical property variation within Inconel 82/182 dissimilar metal

1- Kou, S, " Welding Metallurgy ", 2nd ed., Wiley-interscience, Ney Jersey, USA, 2003.

2- SouzaNeto, F.,Neves, D.,Silva, O.M.M.,Lima, M.S.F., Abdalla, A.J., An Analysis of the Mechanical Behavior of AISI 4130 Steel after TIG and Laser Welding Process, *Procedia Engineering*, Vol. 114, pp. 181-188, 2015.

3- Arivazhagan, N. Singh, S. Prakash, S. Reddy, G, M. " Investigation on AISI 304 austenitic stainless steel to AISI 4140 Low alloy steel dissimilar joints by gas tungsten arc, electron beam and friction welding", *Materials and Design*, Vol. 32, pp. 3036-3050, 2011.

4- Phanindra Reddy, M. Aldrin Sam William, A. Mohan Prashanth, M. Sabaresh Kumar, S.N.

A, Vol. 292(1), pp. 74-82, 2000.

17- J.N. DuPont, J.C. Lippold, S.D. Kiser, Welding Metallurgy and Weldability of Nickel-Base Alloys, Wiley, 1 ed, 2009.

18- H. Shah Hosseini, M. Shamanian, A. Kermanpur "Characterization of microstructures and mechanical properties of Inconel 617/310 stainless steel dissimilar welds" Materials Characterization 62 (2011) 425-431.

۱۹- فراهانی، ا. شمعانیان، م. اشرفی زاده، ف.، "ارزیابی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال جوشکاری غیرمشابه اینکونل ۶۱۷ به فولاد زنگ ۳۰۴"، پنجمین همایش مشترک انجمن مهندسين متالورژی و جامعه علمی ریخته گری ایران، اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۹۰.

20- Kington, A.V. Noble, F.W., "σ phase embrittlement of a type 310 stainless steel", Materials Science and Engineering A, Vol. 138, pp. 259-266, 1991.

21- Ul-Hamid, H.A. Tawancy, H. Nureddin, A.M., "Failure of weld joints between carbon steel pipe and 304 stainless steel elbows", Engineering Failure Analysis, Vol. 12, pp. 181-191, 2005.

22- Kacar, R. Baylan, O., "An Investigation of microstructure property relationships in dissimilar welds between martensitic and austenitic stainless steels", Materials and Design, Vol. 25, pp. 317-329, 2004.

23- Sireesha, M. et al., "Microstructural features of dissimilar welds between 316LN austenitic stainless steel and alloy 800", Materials Science and Engineering A, Vol. 292(1), pp. 74- 82, 2000.

24- w.E. White, IL. May, "Metallographic Observation on the formation and occurrence of ferrite, sigma phase, and carbides in austenitic stainless steel: part I: Studies of AISI Type 310 Stainless Steel", Metallography, Vol.3(1), pp. 35-50.1970.

weld between low alloy steel and 316 stainless steel", International Journal of pressure Vessels and Piping, Vol. 85, pp. 635-646, 2008.

۹- م. پورکبیریان، ح. مستعان، م. رفیعی، تأثیر فلز پرکننده بر خواص اتصال غیرمشابه فولاد ۴۱۳۰ به فولاد زنگ نزن ۳۱۶L، مواد پیشرفته در مهندسی، در دست چاپ.

۱۰- ع. فراهانی، م. شمعانیان، ف. اشرف زاده، "ارزیابی ریز ساختار و خواص مکانیکی اتصال جوشکاری غیر مشابه اینکونل ۶۱۷ به فولاد زنگ نزن ۳۰۴H" پنجمین همایش مشترک انجمن مهندسين متالورژی و جامعه علمی ریخته گری ایران.

۱۱- پ. شایان فر، م. شمعانیان، " جوشکاری غیر مشابه فولاد کوئنچ-تمپر ASTM A517 به فولاد زنگ نزن AISI ۳۱۶L و تاثیر بهینه سازی پارامتر های جوشکاری بر ریز ساختار " فصلنامه علمی پژوهشی فرایند های نوین در مهندسی مواد، سال ۸، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۳.

12- ASTM E8-00 Standard Test Method for Tension of Metallic Materials.

13- ASTM E23-00 Standard Test Method for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials.

14- White, W.E. May, W.E., "Metallographic observations on the formation and occurrence of ferrite, sigma phase, and carbides in austenitic stainless steels: Part I: Studies of AISI Type 310 Stainless Steel", Metallography, Vol. 3(1), pp. 35-50, 1970.

15- Kington, A.V. Noble, F.W., "σ phase embrittlement of a type 310 stainless steel", Materials Science and Engineering A, Vol. 138, pp. 259-266, 1991.

16- M. Sireesha, et al., "Microstructural features of dissimilar welds between 316LN austenitic stainless steel and alloy 800", Materials Science and Engineering