نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال چهارم، شماره 2، پاییز و زمستان1397، صفحه 45-35

بهینه سازی پارامترهای جوشکاری هیبریدی TIG-MIG فولاد زنگ‌نزن 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 زنگ نزن آستنیتیL ۳۱۶ 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 زنگ نزن آستنیتی، جوشکاری هیبریدیTIG-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

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

1- مقدمه

روش‌های جوشکاریTIG 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$Ar+CO_2$به‌عنوان 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 دوگانه[1] (DB-GMAW) [۱]، جوشکاری قوسی دوطرفه[2] (DSAW)، جوشکاری قوسی دو طرفه با جریان برگشتی[3] (BC-DSAW) [۲]، جوشکاری قوسی گاز تنگستن با قوس‌دوگانه[۳]،جوشکاری‌قوسی فلز گاز دوگانه[۴]، جوشکاری قوسی هیبرید[4] (TIG-MIG) [۵] 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 ۴/۵m/min برای فولاد نرم با ضخامت ۲ mm افزایش دهد [۶]. همچنین از این روش برای جوشکاری فلزات غیرهمجنس نیز می توان بهره گرفت [۷]. 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 [۵].

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 ظاهرجوش و نسبت عمق به عرض آن به‌وسیله طراحی آزمایش تاگوچی بر روی فولاد زنگ‌نزن آستنیتی۳۱۶ L بررسی می‌کند. در ادامه ساختار جوش هیبریدی با جوش‌هایMIG و TIGدر حرارت ورودی یکسان مقایسه می‌شود.

2- مواد و روش تحقیق

این پژوهش روی فولاد زنگ نزن آستنیتی۳۱۶ L AISI با ابعاد ۱۲۰ mm× ۶۰mm ×۱۲ mm به روش جوشکاری هیبریدی TIG-MIG به صورت بدون درز با حرکت آغازین تورچ TIG انجام گرفت. ابتدا نمونه روی میز متحرک با قابلیت تنظیم سرعت قرار گرفت و تورچ های 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(۱) نمای کلی فرآیند را نشان می‌دهد. همچنین جدول(۱) ترکیب شیمیایی فلز پایه و سیم‌جوش را ارایه می‌دهد. آرگون‌خالص بادبی ۱۲ 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 جریان $TIG(I_T)$، ارتفاع‌قوس $TIG(h)$، زاویه تورچ$TIG(\theta_T)$ و فاصله بین دو قوس (d). هر فاکتور در سه سطح توسط طراحی آزمایش تاگوچی و استفاده از آرایه L۲۷ مورد بررسی قرار گرفت. جدول(۲) 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 L۲۷ 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

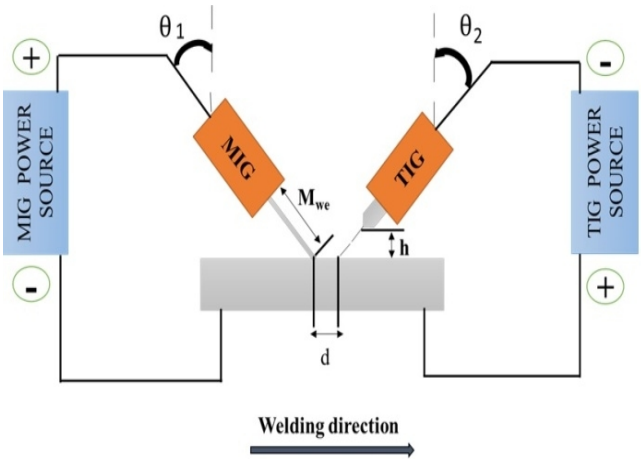
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

جدول۱- 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

جدول۲- فاکتورها و سطح ها در آزمایش متعامد.

Levels	Factors						
	θ_M(deg)	M_{we}(mm)	I_M (A)	I_T (A)	h (mm)	θ_T(deg)	d (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

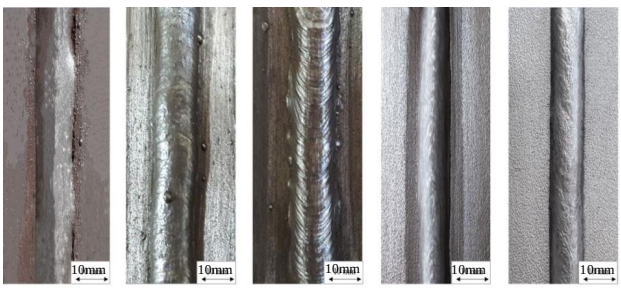


شکل۱- نمای کلی فرآیند جوشکاری هیبریدی TIG-MIG.

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 نمونه های 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 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 $H_2O50\%HNO_3$ +50% تحت جریان۵ آمپر قرار گرفت و به مدت ۴۰ ثانیه الکتروپولیش و الکترواچ شدند. برای شناسایی فازهای فلز پایه از آنالیز تفرق اشعه ایکس[1](XRD) استفاده شد.



شکل۲- 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 TIG وMIG (۱۲L/min)، پارامترهای مؤثر بر جوش در روش هیبریدی TIG-MIG از طریق طراحی آزمایش تاگوچی و استفاده از آرایه

1- X-Ray diffraction

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

جدول۳- 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 mm, I			d = 5 mm, I_M = 210 A, I_T = 250 A, θ_M= 20°, θ_T= 30°, M_{we}= 20 m					

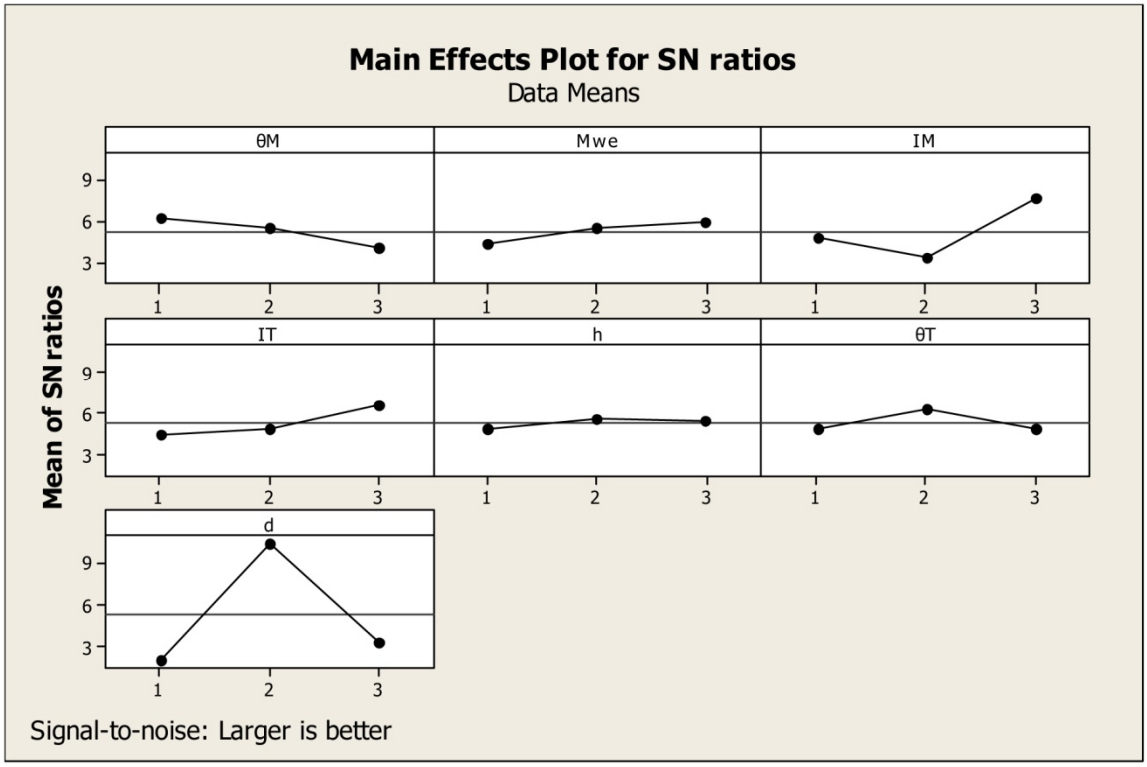
L۲۷ مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه آزمایش و پارامترهای بهینه در جدول(۳) مشاهده می‌شود. نتایج نشان داد که از نظر کیفیت ظاهری جوش، به ترتیب، فاصله بین دو قوس، جریان MIG و جریان TIG دارای بیشترین تأثیرات هستند. مقدار پارامترهای بهینه، منطبق بر پارامترهای نمونه جوش شماره ۸ هستند و این جوش تنها نمونه‌ای است 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 نمونه‌های جوش

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

در هر آزمایش، هدف یافتن بالاترین نسبت S/N در نتایج است. مقدار S/N بالا نشان‌دهنده 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 می‌شود. نمودار نسبت S/N مربوط به اثر هر کدام از سطوح و پارامترهای جوشکاری بر کیفیت ظاهری جوش در شکل(۳) مشاهده می‌شود. مطابق شکل(۳)، مهم‌ترین پارامتر که دارای بیشترین محدوده نسبت S/N است، فاصله‌بین‌سیم‌جوش

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]



شکل۳- نمودار میانگین نسبت سیگنال به نویزبرای کیفیت ظاهری نمونه های جوش در آزمایش متعامد L۲۷

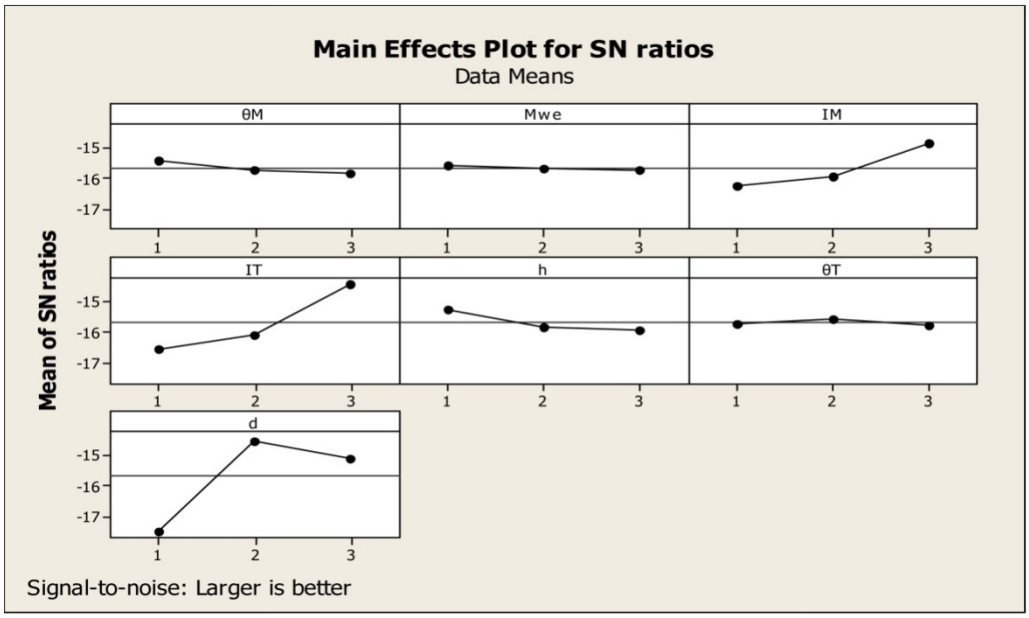
و الکترود (d) است. با تغییر این فاصله از سطح بهینه خود که سطح دوم (مقدار ۵mm) با بیشترین نسبت S/N است به سطوح دیگر، افت شدیدی در کیفیت ظاهری جوش ایجاد شده و نسبت S/N به شدت کاهش می‌یابد. جریان MIG و جریان TIG پارامترهای مهم بعدی با بیشترین دامنه نسبت S/N هستند و بنابراین بیشترین تأثیررا بر کیفیت ظاهری جوش می‌گذارند. کمترین اثر بر کیفیت ظاهری جوش مربوط به ارتفاع قوس TIG است. این ارتفاع اثر قابل توجهی بر مقدار جریان عبوری بین الکترود 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 می‌شود و به روش مشابه مقدار بهینه‌ی پارامترهای دیگر برای رسیـــدن به بالاتـرین کیفیت ظـاهری جـوش هیبـریدی انتخاب می‌شوند.

مقدار پارامترهای بهینه، منطبق بر پارامترهای نمونه جوش شماره ۸ هستند و این جوش تنها نمونه‌ای 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 نمونه‌های جوش

نسبت عمق به عرض تمام نمونه های جوش در آزمایش متعامد L۲۷ 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 می‌شود. مطابق شکل(۴)، مهمترین پارامتر با بیشترین دامنه نسبت S/N، فاصله بین سیم و الکترود (d) می‌باشد. با تغیر سطح در این پارامتر، نسبت عمق به عرض دچار تغیر خیلی زیادی می‌شود 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.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]



شکل۴- نمودار میانگین نسبت سیگنال به نویز برای نسبت عمق به عرض نمونه های جوش در آزمایش متعامد L۲۷

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، تغیر در سطوح این پارامتر اثر قابل ملاحظه‌ای را بر نتیجه کار نخواهد داشت. در مورد ارتفاع قوس TIG(IT) می‌توان گفت هرچه ارتفاع قوس کمتر باشد نسبت عمق به عرض جوش افزایش می‌یابد.

مطابق شکل(۴)، وقتی ارتفاع قوس TIG از ۳ mm به ۵ mm تغیر 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 می‌شود 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.

میانگین نسبت عمق به عرض جوش برای نمونه‌های با کیفیت ۴ بیشتر از این مقدار میانگین برای نمونه‌های با کیفیت ۳ و همچنین نمونه‌های با کیفیت پایین‌تر است. چنین روندی برای بقیه موارد نیز صادق است. بنابراین می‌توان به قابل اعتماد بودن طراحی آزمایش تاگوچی و همچنین نتایج حاصل از این پژوهش برای روش نوین جوشکاری هیبریدیTIG-MIG 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 نمی‌تواند 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 نمی‌افتد. از طرف دیگر، قوس TIG در ذوب کردن فیلر MIG نقش زیادی دارد و عیوبی چون سوختگی کناره جوش در بیشتر مواقع رخ می‌دهد. وقتی فاصله بین دو قوس مناسب است (۵ mm)، قوس MIG پایدار می‌شود که می‌تواند به دلیل عبور جریان مناسبی مابین الکترود TIG و سیم جـوش MIG باشد. همچنین قوس TIG نقش منـاسبی در ذوب

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

جدول۴- 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

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

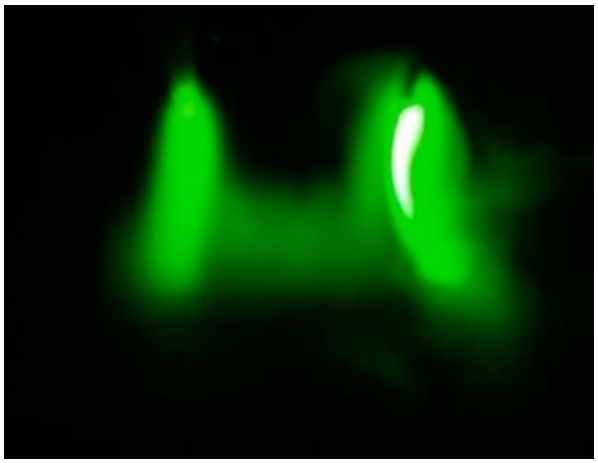
3-5- درشت ساختار

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.



شکل۵- 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 TIGو نیز ۵۰٪نسبت به MIG2 افـزایش داشتـه است. وجود دو قوس در جوشکاری هیبریدی، می‌تواند باعث توزیع دمائی مناسب در پلاسما و حوضچه جوش شده و نسبت عمق به عرض را افزایش دهد همچنین به دلیل اثر قوس TIG بر پایدارسازی 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.



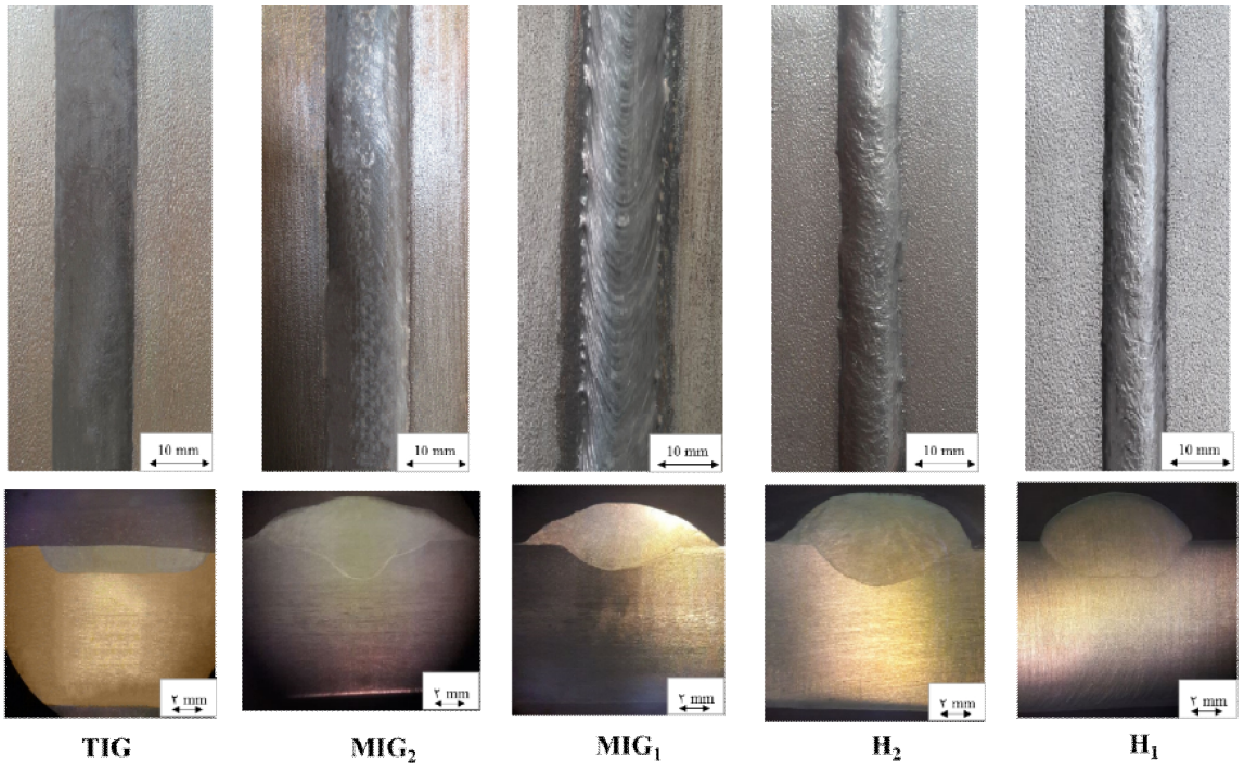
شکل۶- شکل قوس در فاصله بهینه بین سیم جوش و الکترود (A=250 A, IT= 210 IM).

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 چـرخه حـرارتی جـوش تقـریباً از بیـن‌رفت و با وجود این،

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]



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

متوسط اندازه دانه نسبت به فلز پایه تغییر نداشته است. در ناحیه ذوب جزئی[1] (PMZ) مرز دانه‌های فلز پایه بصورت جزئی ذوب می‌شود و در دمای بالا ساختاری خمیری بوجود می‌آید. با توجه به ترکیب شیمیایی فلز پایه و سیم جوش، انجماد در حوضچه مذاب با جوانه‌های فریت اولیه شروع می‌شود و با سرد شدن ناحیه، استحاله فریت به آستنیت اتفاق می‌افتد. 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 دانه‌ها مشخص است به‌طوری‌که از حوضچه جوش به سمت فلز پایه اندازه دانه‌هاکوچکتر می‌شود. شکل(۱۱)، ریزساختار ناحیه HAZجوش‌های مختلف این پژوهش را با همدیگر مقایسه کرده است. نکته قابل توجه در این تصاویر میکروسکوپ نوری این است که در جوش‌های هیبریدی H1و H2 (شکل ۱۱-الف و ۱۱-ب)، وسعت و اندازه دانه ناحیه HAZ کمتر از جوش‌های دیگر است.

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

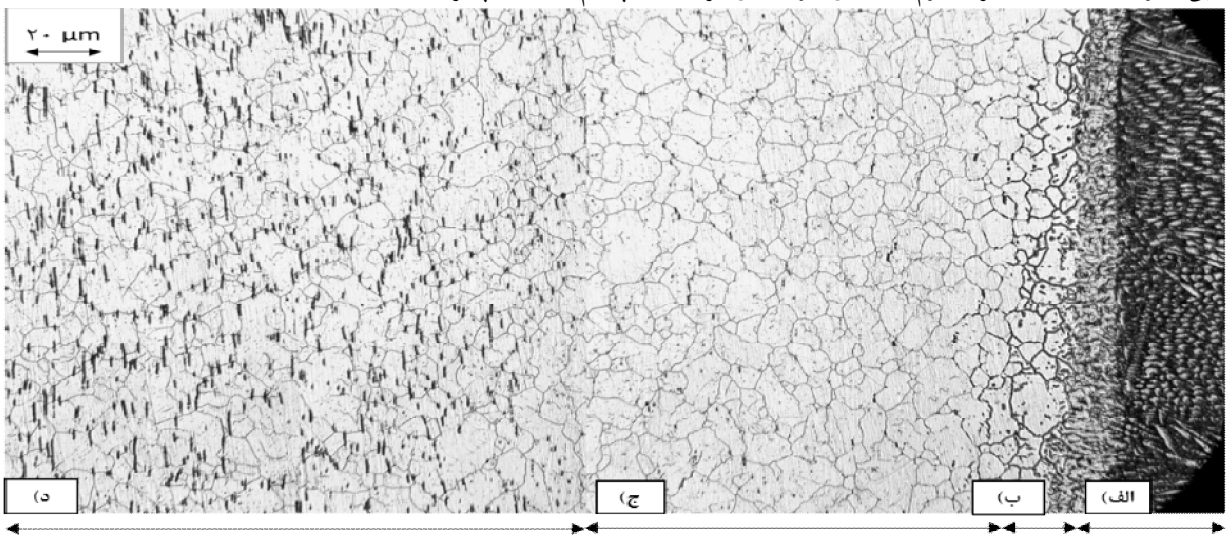
$$D_f^n - D_0^n = A\,[\exp(-Q/RT)]\,(t_1 - t_2) \qquad (۱)$$

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 فعالسازی، 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 می‌یابد. در جوش‌های هیبریدی با دو قوس، حرارت به طور وسیع‌تری پخش می‌شود و باعث کاهش پیک دمایی و کاهش زمان ماندگاری در آن دما نسبت به جوش‌های با یک قوس می‌شود [۹]. این امر سبب افزایش سرعت سرمایش و کاهش وسعت و اندازه دانه ناحیه HAZ در جوش هیبریدی می‌گردد.

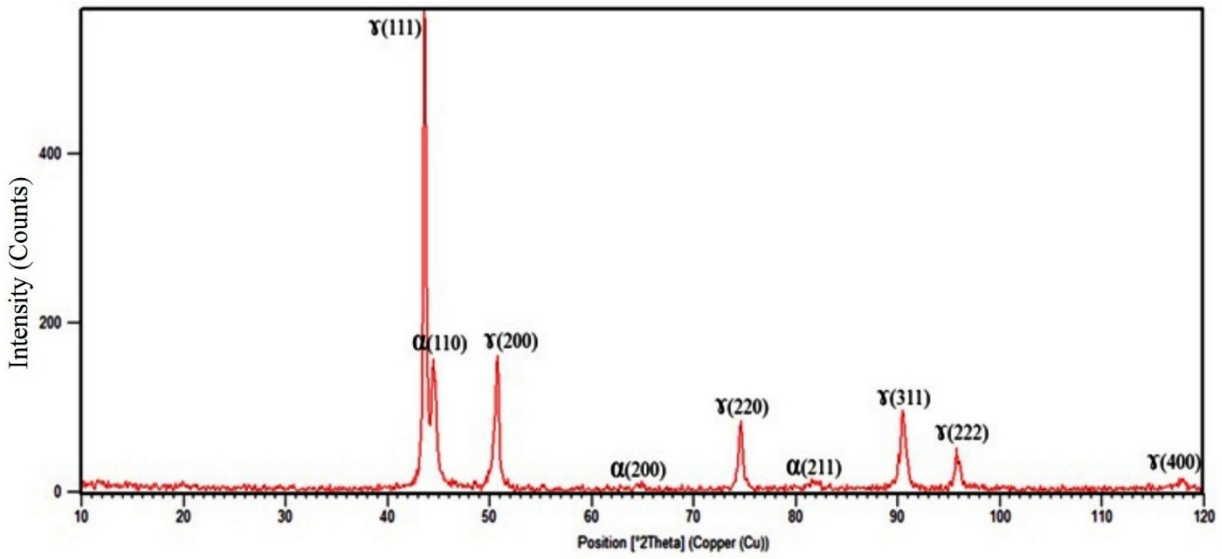
تحقیقی که در سال ۲۰۱۴ روی فولاد نرم انجام گرفت، نشان داد که اندازه دانه و وسعت ناحیه HAZ برای جوشکاری

1 - Partially melted zone

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]



شکل۸- ریزساختار نواحی مختلف جوش هیبریدی H1: الف) حوضچه مذاب، ب) ناحیه PMZ، ج) ناحیه HAZ و د) فلز پایه.



شکل۹- آنالیز XRD برای فولاد زنگ نزن آستنیتی L ۳۱۶ پایه.

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

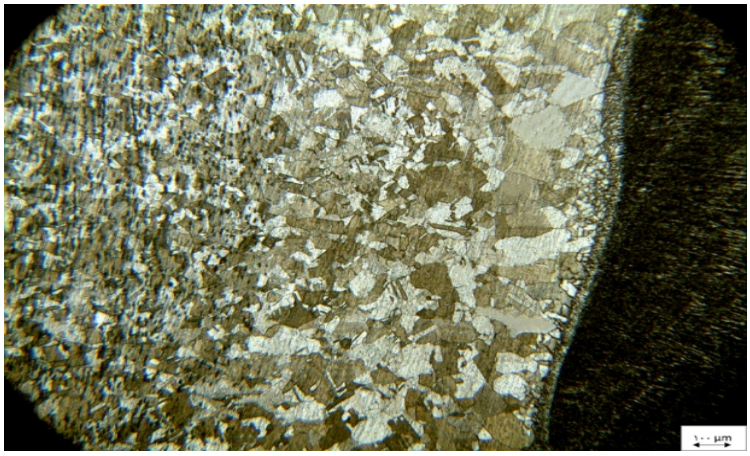
4- نتیجه گیری

-مهمترین پارامتر در روش هیبرید TIG-MIG فولاد زنگ‌نزن آستنیتیL ۳۱۶، از نظر دستیابی به بهترین کیفیت ظاهری و 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 TIGو MIG پارامترهای مؤثر بعدی هستند.

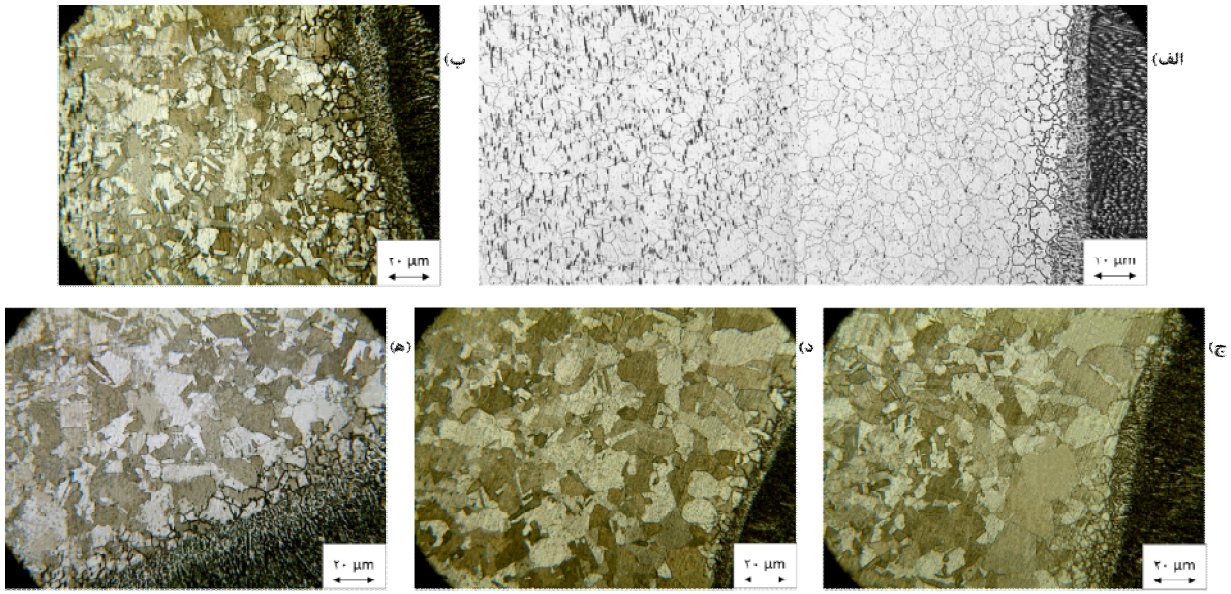
-در حرارت ورودی یکسان، نسبت عمق به عرض جوش H1 به مقدار ۹۰٪ نسبت به MIG1 و TIGو نیز ۵۰٪ نسبت به MIG2 افزایش داشته است.

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

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]



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



شکل۱۱- ریزساختار ناحیه HAZ: الف) H1، ب) H2، ج) MIG1، د) MIG2 و ه) TIG.

و MIG است.

منابع

1- Kou. S, " Welding Metallurgy ", 2nd ed., Wiley-interscince, 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. 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

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

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 مهندسین 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 AISI۳۱۶L وتاثیر 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 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 اینکونل۶۱۷ به فولادزنگ ۳۰۴ "،پنجمین همایش مشترک انجمن مهندسین متالورژی وجامعه 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.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]