علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال سوم، شماره 2، پاییز و زمستان 1396، صفحه 32-20

اندازه گیری تنش پسماند در جوشکاری TIG فولاد زنگ نزن AISI 304 به روش آلتراسونیک

آرش پرورش[1]، حامد ثابت[1*]، مهران روح نیا[2]

1- گروه مهندسی مواد و متالورژی ، واحد کرج ، دانشگاه آزاد اسلامی ، کرج ، ایران

2- گروه صنایع چوب و کاغذ ، واحد کرج ، دانشگاه آزاد اسلامی ، کرج ، ایران

(دریافت مقاله: 1396/02/17 ؛ دریافت نسخهٔ نهایی: 1396/07/23)

چکیده

در این پروژه برای اندازه گیری تنش پس ماند جوش فولاد زنگ نزن AISI 304از روش اندازه‌گیری موج طولی شکست یافته بحرانی و همچنین روش سوراخ کاری استفاده شده است. به این منظور پارامترهای جریان پالس، جریان زمینه، درصد زمان پالس و فرکانس پالس به عنوان پارامترهای متغییر در نظر گرفته شده و از طراحی آزمایش تاگوچیLg استفاده شد. هرکدام از نمونه ها مورد آزمون کشش و سختی سنجی و همچنین بررسی ریز ساختار قرار گرفتند. نتایج نشان میدهد که جریان زمینه موثرترین پارامتر در تنش‌های پس‌ماند بوده و جریان پالس عامل مهم بعدی و درصد زمان پالس و فرکانس پالس در اولویت های بعدی قرار دارند.

کلمات کلیدی: تنش پس ماند، سوراخ کاری،آلتراسونیک، فولاد زنگ نزن304 AISI ، رشد ستونی.

Measuring of Residual Stress in TIG Welding of the AISI 304 Stainless Steel by Ultrasonic Method

A. Parvaresh[1], H. Sabet[1*], M. Roohnia[2]

1-Department of Materials Engineering, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran.

2- Department of Wood and Paper Science and Technology, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran.

(Received 7 May 2017 ; Accepted 14 October 2017)

Abstract

In this research, the effect of different welding parameters on residual stress and microstructure of the weld region, as well as the comparison of two methods of measuring residual stress using critical fracture longitudinal wave method and preformation method have been investigated. For this purpose, the taguchi DOE methodology is used as a statistical method to optimize four parameters of pulse current, base current, and pulse on time% and pulse frequency to minimize longitudinal residual stresses in austenite 304 AISI stainless steel. After welding, stress measurements were performed using two methods critical fracture longitudinal and perforation, and hardness, tensile and OM tests were performed on

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: h-sabet@kiau.ac.ir

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-28]

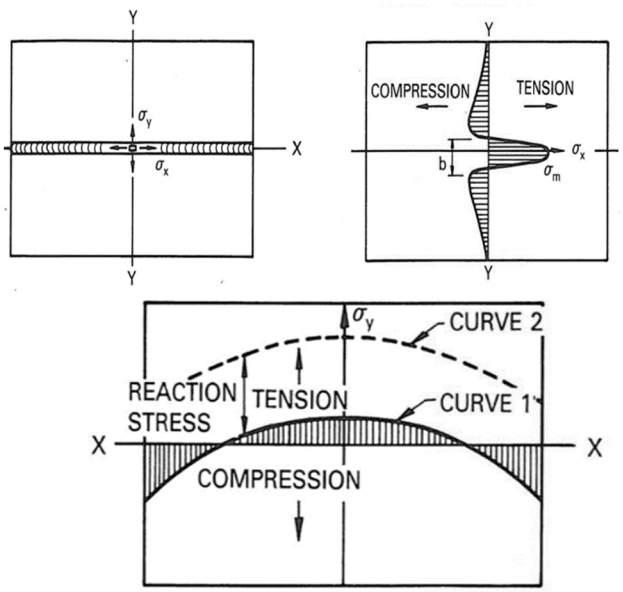
the specimens. The tests results show that at all levels of the pulse parameters arranged with the standard L9 Taguchi array, the incident heat input is irrefutable and the effect of this parameter is move then 50%. The optimum conditions obtained while the highest frequency level should be considered. The general trend is achieved from the residual stress measurement charts is consistent with the logic of stress distribution in both methods. Sample number 1 with stress equivalent to 232 MPa and sample number 9 with stress of MPa 126 in ultrasonic method with frequency 4 MHz have the highest and lowest stress among different samples, respectively. The size of the coaxial grains weld was directly related to the incoming heat, so that the least amount of coaxial grains in the welding center was related to specimens NO. 3 and 9 with grain size of 8 µm and 9 µm, which in these samples had the lowest amount of welding heat is measured. The samples 1 and 4 with HV 128 and HV 144 hardness and MPa 633 and MPa 639 have the least hardness and tensile strength and the highest strength and hardness of sampled 3 and 9 with 166 and 161 hardness and tensile strength MPa 703 and MPa 695.

Keywords: Residual Stress, Critical Failure Longitudinal Wave Method, Variance Analysis, , TIG Welding, Austenitic Stainless Steel**.**

1- مقدمه

یک مقطع جوش به صورت موضعی با اکثر فرآیندهای جوشکاری گرما داده می‌شود. میزان این گرما به قطعه کار تاثیر زیادی روی مقدار و توزیع تنش‌های پس‌ماند خواهد گذاشت[1]. ناحیه تحت اثر گرما[1] به سرعت به دمای ذوب نزدیک می‌شود که بسیار بالاتر از دمایی است که فلز پایه در آن قرار دارد. به محض آن‌که حوضچه جوش منجمد و منقبض می‌گردد، شروع به وارد نمودن تنش به فلز اطراف و ناحیه تحت اثر گرما می‌نماید. در هنگام شروع انجماد، فلز داغ و نسبتاً ضعیف بوده و تنش کمی را تحمل می‌کند. در حین سرد شدن تا دمای محیط به تدریج تنش در منطقه جوش افزایش می‌یابد و سرانجام به نقطه تسلیم فلز پایه و منطقه تحت اثر گرما می‌رسد. زمانی‌که یک جوش به تدریج به‌وجود می‌آید، سرتاسر قسمت‌های منجمد شده از جوش در مقابل انقباض‌های دیگر قسمت‌های جوش مقاومت می‌کنند. در نتیجه قسمت‌های جوش خورده ابتدایی به صورت کششی در راستای طولی جوش کرنش می‌یابند[2و3].

روسینیو همکاران[4] تنش‌های پس‌ماند را به دو دسته تنش‌هایی پس‌ماند کلان‌نگر، که در کل بدنه ماده گسترش یافته و مقیاس آن‌ها بزرگتر از اندازه دانه‌ها است و تنش‌های پس‌ماند جزیی‌نگر، که در داخل دانه‌ها و به دلیل وجود عیوب کریستالی وجود دارند، تقسیم بندی نموده اند. نمونه ای از توزیع تنش ها در مقاطع جوش در شکل 1 نمایش داده شده است.



شکل1- توزیع تنش طولی و عرضی در یک جوش تخت[5]

همانطور که در شکل مشاهده می شود تنش‌های پس‌ماند کششی در بالاترین مقدار خود در ناحیه نزدیک به جوش اتفاق می‌افتد. هنگامی که کمی از منطقه جوش فاصله می‌گیریم به سرعت به صفر میرسند. اگر بیشتر دور شویم تنش‌های پس‌ماند، فشاری می‌شوند. توزیع تنش با دو متغیربیشترین مقدار تنش در ناحیه جوشσm و عرض منطقه کششی تنش پس‌ماند b مشخص می شود. در مقاطع جوش که از فولاد کم کربن هستند بیشترین مقدار تنش معمولاً به اندازه تنش تسلیم فلز جوش بالا است[6-8].

1- Heat affected zone (HAZ)

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-28]

توزیع تنش پس‌ماند طولی را می‌توان با فرمول زیر توضیح داد:

$$\sigma_x(y)=\sigma_m\left\{1-(y/b)^2\right\}exp\left\{-0.5(y/b)^2\right\} \quad (1)$$

توزیع تنش پس‌ماند عرضی σ_y در طول جوش نیز در شکل 1 نشان داده شده است. تنش کششی نسبتاً پایین‌تری در مرکز اتصال و تنش‌های فشاری در دو طرف اتصال هستند. اگر انقباض نهایی اتصال با یک قید خارجی محدود شود، تنش‌های کششی تقریباً یکنواخت در کل جوش به عنوان تنش‌های واکنشی به تنش‌های پس‌ماند اضافه می‌شود. تنش‌های پس‌ماند مقاومت شکست سازه‌های جوش را فقط در هنگامی که شرایط خاصی حاکم باشد، کاهش می‌دهد. در فلزات و مناطق جوش کاری شده روش‌های متفاوتی برای اندازه گیری تنش باقی مانده می‌تواند به کار رود که از جمله این روش های می توان به روش پراش اشعه X[1]، کرنش‌سنجی سوراخ‌کاری[2] و روش فراصوت[3] اشاره کرد[9-11]. در سال 2009 پالانیچامی و همکاران [12] توانستند تنش‌های پس‌ماند را در یک ورق فولادی به ضخامت 7 میلیمتر از جنس 316LN که با چند پاس جوش TIG انجام گرفته اندازه‌گیری نمایند. در این مقاله برای اولین بار تنش در ضخامت‌های پایین‌تر از 10 میلیمتر با استفاده از امواج طولی انتشار یافته(Lcr[4]) به دست آمده است.

صالیحا گاچی و همکاران [13] در سال 2009 برای اولین بار تنش را در آلومینیوم 7108 با شیوه فراصوت به دست آوردند. تا سال 2014 عملاً به جز چند مورد مقالات کنفرانسی که خیلی جزیی به این مقوله پرداخته‌اند، پژوهش معناداری تاکنون صورت نگرفته است. تا اینکه در سال 2014 مقالات حاصل از پژوهش‌های صورت گرفته در دانشگاه امیرکبیر به سرپرستی دکتر جوادی چاپ شدند[14-16]. در این مقالات تفاوت چندانی در تکنیک به کار رفته در اندازه‌گیری تنش‌ها ارایه نشده و بیشتر از آن به عنوان ابزاری مثلاً اعتبارسنجی شبیه‌سازی عددی فرآیند جوش که تنش‌های باقی‌مانده را حدس می‌زد استفاده شده است.

در این مقالات دقت اندازه‌گیری زمان پرواز در همان حد 0/1 نانوثانیه بود. عمق نفوذ موج برای فرکانس‌های 5، 4، 2 و 1 مگاهرتز به ترتیب 1، 1/5، 3 و 6 میلیمتر اندازه گیری شده است. در این تحقیقات به تاثیر پارامترهای مختلف در جوشکاری بر روی تنش پس ماند اشاره نشده و با ثابت گرفتن پارامترهای جوشکاری تنش پس ماند اندازه گیری شده است[15].

در تحقیق حاضر به بررسی اندازه گیری تنش پس ماند در منطقه جوش فولاد زنگ نزن AISI 304 با استفاده از روش امواج طولی انتشار و صحه سنجی آن با استفاده از روش سوراخ کاری پرداخته و در ادامه با انجام طراحی آزمایش به روش تاگوچی بهترین داده ها برای کمترین میزان تنش پس ماند در قطعه بدست خواهیم آورد.

2-مواد و روش آزمون

2-1-مواد مورد استفاده و آماده سازی

به منظور بررسی تنش پس ماند در جوشکاری TIG از فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI 304 با ترکیب شیمیایی ارائه شده در جدول(1) استفاده گردید. جهت آماده‌سازی نمونه‌ها برای جوشکاری فلز پایه، نمونه‌هایی با ابعاد 6×50×400 میلیمتر بریده شد و سپس از ماشین فرز برای پخ‌زنی نمونه‌ها استفاده شد. طرح اتصال به‌صورت جناغی یک‌طرفه (V-شکل) با زاویه شیار 70 درجه در نظر گرفته شد (شکل 2).

2-2- فرایند جوشکاری و طراحی آزمایش

برای جوشکاری فرایند جوشکاری قوسی تنگستن- گاز (GTAW) انتخاب و جوشکاری با استفاده از دستگاه جوش نوع Fronius به صورت اتوماتیک انجام گردید.

---

1 - X-Ray Diffraction method

2 -Hole-Drilling Technique

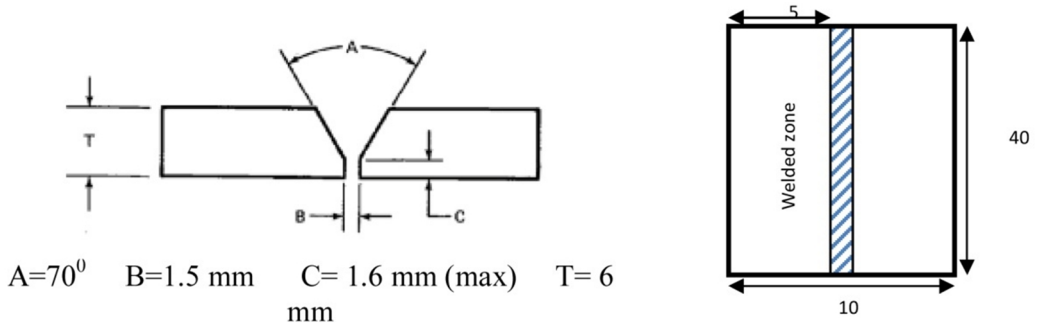
3 - Ultrasonic method

4- critically refracted longitudinal

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-28]

جدول1- ترکیب شیمیایی فلز پایه مورد استفاده در تحقیق (درصد وزنی)

آلیاژ	حالت	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	S	P	Fe
AISI 304	آنیل شده	۰/۰۶	۰/۴۸	۱/۱۳	۱۸/۶۴	۸/۱۲	۰/۱۴	۰/۳۴	۰/۰۰۱	۰/۰۰۳	بقیه



شکل2- ابعاد نمونه ها پس از جوش کاری و نمایی از طرح اتصال مورد استفاده به‌همراه مشخصات ابعادی آن

جهت جوشکاری طبق استاندارد انجمن جوش آمریکا [3] AWS A5.9 فلز پرکننده، فولاد 308 کم کربن (ER308L) به قطر 1/2 میلیمتر بوده انتخاب گردید.

از آن‌جایی که هدف پروژه تعیین سهم پارامترهای پالسی بر میزان تنش‌های باقی‌مانده است، بنابراین باید کلیه عوامل تعیین-کننده در القای تنش‌های پس‌ماند در تمام نمونه‌های جوش ثابت بماند.

تمامی نمونه ها بعد از جوشکاری پاس پشت و پاس ریشه در دمای 400 درجه سلسیوس و به مدت 6 ساعت طبق استاندارد MIL-HT-21 در کوره گرم و سپس به آرامی در داخل آن سرد شدند. جهت تعیین سهم هر پارامتر جوشکاری در میزان تنش پس ماند از طراحی آزمایش تاگوچی L9 استفاده شد متغییر های استفاده شده و سطوح هر کدام از پارامترها در جدول 3 تا 5 نشان داده شده است.

از آنجایی که تنش پس ماند در جوش بسیار متاثر از حرارت ورودی در حین جوشکاری می باشد، حرارت ورودی هر آزمایش بصورت جداگانه و با استفاده از فرمول 2 و 3 محاسبه شده که در جدول 5 نشان داده شده است.

$$I_m = \frac{I_p \times t_p + I_b \times t_b}{t_p + t_b} \quad (2)$$

$$HI = \eta \times \frac{I_m \times V}{S} \quad (3)$$

جدول2- متغییر های جوشکاری در طراحی آزمایش

پارامتر	Designation	سطح		
		1	2	3
Pulse current	A	210	195	180
Background current	B	110	90	80
% on time	C	57	47	37
Pulse frequency	D	4	3	2.5

جدول 3-جدول طراحی آزمایش تاگوچی L9

شماره آزمایش	فاکتور			
	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

2-3- محاسبه تنش پس ماند

جهت اندازه گیری تنش پس ماند از دو روش فراصوت و سوراخ کاری مرکزی استفاده شد. تجهیزات مورد استفاده در

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-28]

جدول 4- پارامترهای نهایی استفاده شده در آزمایش

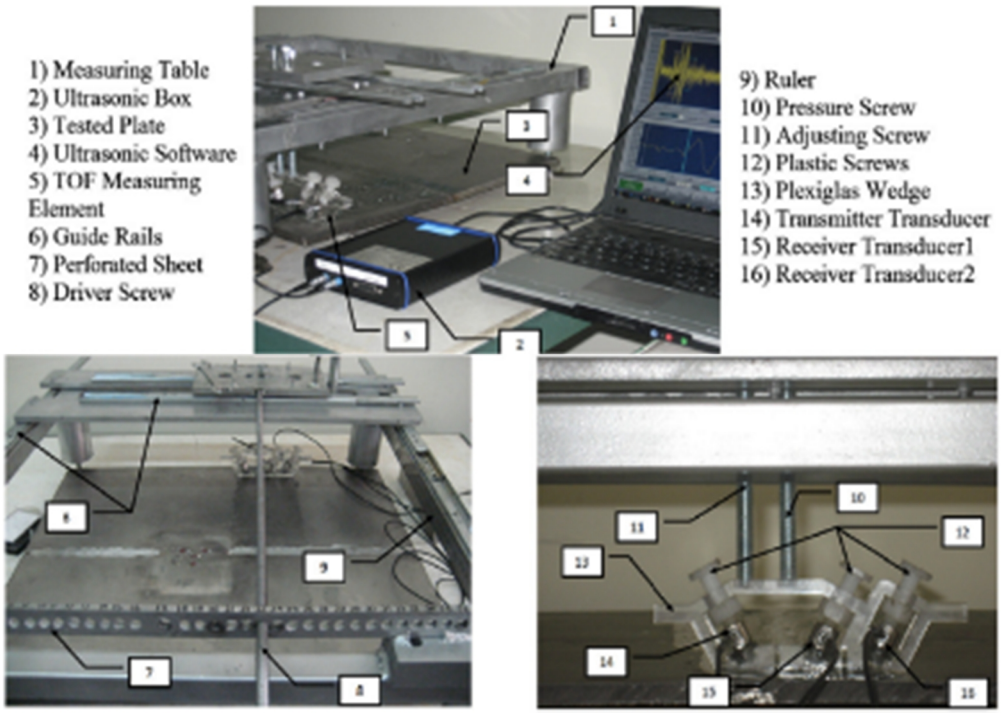
trial	peak current (A)	base current (A)	% on time	frequency (Hz)	peak time (ms)	base time (ms)	average current (A)	Torch speed (mm/min)	initial slope time (ms)	initial current (A)	final slope time (ms)	current time final	wire speed (cm/min)	heat input (KJ/mm)
1	210	110	57	4	143	108	167	50	500	55	500	55	48	1.26
2	210	90	47	3	157	177	146	50	500	55	500	55	48	1.11
3	210	80	37	2.5	148	252	128	50	500	55	500	55	48	0.96
4	195	110	47	2.5	188	212	150	50	500	55	500	55	48	1.13
5	195	90	37	4	93	158	129	50	500	55	500	55	48	0.97
6	195	80	57	3	190	143	146	50	500	55	500	55	48	1.10
7	180	110	37	3	123	210	136	50	500	55	500	55	48	1.03
8	180	90	57	2.5	228	172	141	50	500	55	500	55	48	1.07
9	180	80	47	4	118	133	127	50	500	55	500	55	48	0.96

روش فراصوتی در شکل 3نشان داده شده است. عمده این تجهیزات شامل پراب با فرکانس 2 و 4 مگاهرتز از نوع تماسی، کفشک، دستگاه فرستنده و گیرنده امواج فراصوت، دستگاه تنظیم کننده موقعیت کفشک و کامپیوتر جهت نمایش، ثبت و محاسبه داده ها می باشد همچنین جهت تعیین ضریب آکوستوالاستیک نیاز به دستگاه کشش و آماده سازی نمونه ها بوده و از آن جایی که ضریب آکوستوالاستیک برای محاسبه تنش پس ماند در هر سه منطقه ریزساختاری جوش تغییر می کند، باید آن را برای هر کدام از این مناطق جداگانه به دست آورد. طریقه کار به این گونه است که چون نمونه های آزمون کشش بر طبق استاندارد تهیه می شود، حداقل ابعاد نمونه ها باید با این استاندارد مطابقت نماید. چون طول کفشک مورد استفاده پراب ها حدود 5 سانتیمتر است بنابراین حداقل اندازه نمونه ها باید از نوع لایه ای باشد.

جهت اعتباربخشی به نتایج حاصل، از روش سوراخ کاری مرکزی استفاده می شود این روش یکی از مهمترین روش های اندازه گیری تنش پسماند به روش مکانیکی است که دراین روش، مقدار تنش باقیمانده به وسیله اندازه گیری مقـدارکرنش آزادشده بااستفاده ازکرنش سنج های مکانیکی و الکترونیکی تعیین می گردد. درروش سوراخ کاری مرکزی یک سوراخ کوچک درصفحه حاوی تنش ایجاد می شود. با ایجاد این سوراخ، تنش های باقیمانده دراطراف سوراخ آزادشده ومی توان باقراردادن کرنش سنج دراطراف سوراخ،مقدار تنش آزادشده را اندازه گیری نمود.

ابتدا کرنش سنج برروی نمونه موردنظر و در ناحیه حوضچه جوش، ناحیه تحت تأثیر حرارت و مرکز قطعه قرارداده شد (شکل 4)، پس ازاتصال سیم های رابط به دستگاه و قراردادن دریل مربوطه در مرکز کرنش سنج وبا آغاز عملیات سوراخکاری یک سوراخ با قطر مشخص ودرمرکز کرنش سنج ایجادمی شود. کرنش سنج مورد استفاده کرنش سنج FRS-2-23 بوده که یکی از رایج ترین انواع کرنش سنج می باشد. مقدارکرنش های خوانده شده ناشی از آزاد شدن تنشهادرحین سوراخ شدن رایادداشت کرده ودرپایان برای هرسه نمونه،سه کرنش بانام ε_1، ε_2 و ε_3 به دست آمد که باقراردادن آنها در روابط مرتبط و استخراج شده از استانداردASTM E837 مقدارتنش مـاکزیمم،مینیمـم وهمچنـین زاویه بین آنها به دست

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-28]



شکل3- تجهیزات به کار رفته جهت اندازه گیری تنش پس ماند به روش فراصوتی

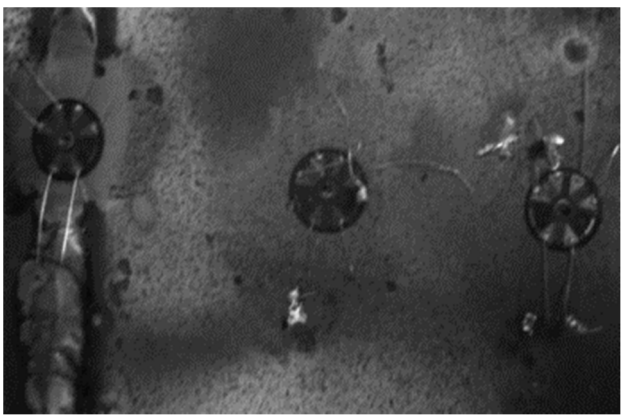
خواهدآمد پس از انجام جوشکاری نمونه ها مورد ارزیابی ریز ساختار با استفاده از میکروسکوپ نوری نیز قرار گرفتند.

3- نتایج و بحث

3-1- اندازه گیری تنش پس ماند

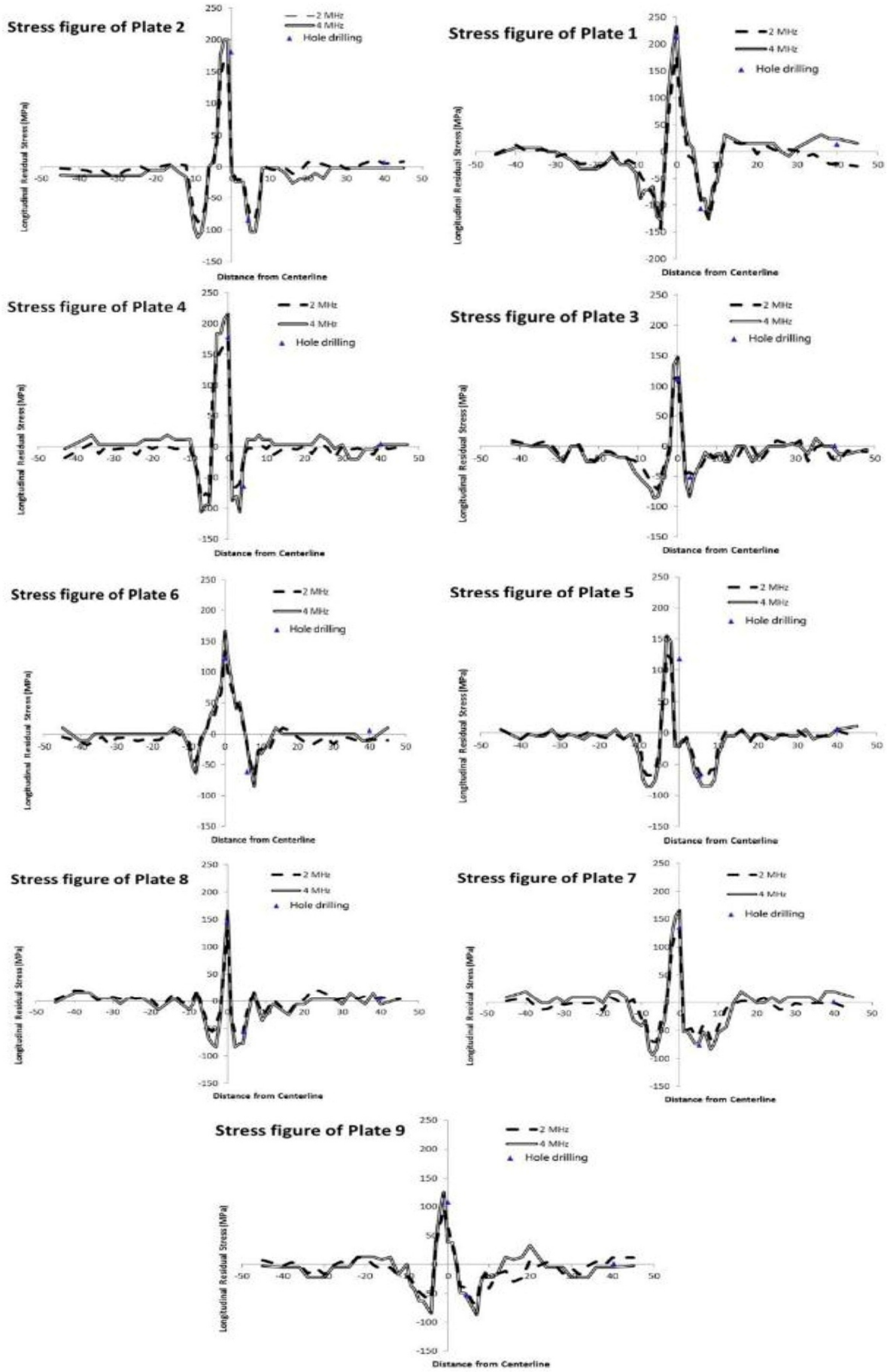
نتایج حاصل از تست اکوستیک با فرکانس 4 مگاهرتز و 2 مگاهرتز و همچنین نتایج حاصل از تست سوراخ کاری برای اندازه گیری تنش پس ماند در شکل 5 نشان داده شده است. در این نمودارها محور افقی نشان دهنده فاصله از مبدا مختصات است. مبدا مختصات دقیقاً منطبق با خط مرکزی جوش بوده به این ترتیب اعداد مثبت یعنی موقعیت تنش در سمت راست خط جوش و مقدار منفی سمت چپ جوش را نشان می دهد. در تمامی نمودارهای مربوط به تست اکوستیک در فواصل 10 ± میلیمتر از مبدا، نقاط پایش شده به فاصله 1 میلیمتر از یکدیگر بوده که به دلیل تغییرات شدید تنش در این منطقه کوچک است. در بقیه نقاط دورتر هر نقطه پایش شده به فواصل 2 میلیمتر از هم قرار دارد.

با توجه به نمودار های بدست آمده می توان گفت که شکل کلی تنش ها مطابق با گراف های استاندارد AWS می باشد، همانگونه که از شکل ها مشخص است در تمامی نمودارها روند کاهش تنش با فاصله گرفتن از خط مرکزی جوش بسیار شدید است، علت این امر ناشی از مقادیر تنش ها است که از مقدار بیشینه به سرعت به مقدار کمینه خود (تنش فشاری) در منطقه متاثر از حرارت (HAZ) می رسند. لازم به ذکر است که در جوشکاری TIG حوضچه جوش کوچکی در مقایسه با دیگر روش های جوشکاری نظیر SAW ایجاد می شود . به همین دلیل نمودارهای مشاهده شده حالت تیزتری در مقایسه با کارهای قبلی دارند که با روش های دیگر جوشکاری شده اند[17].



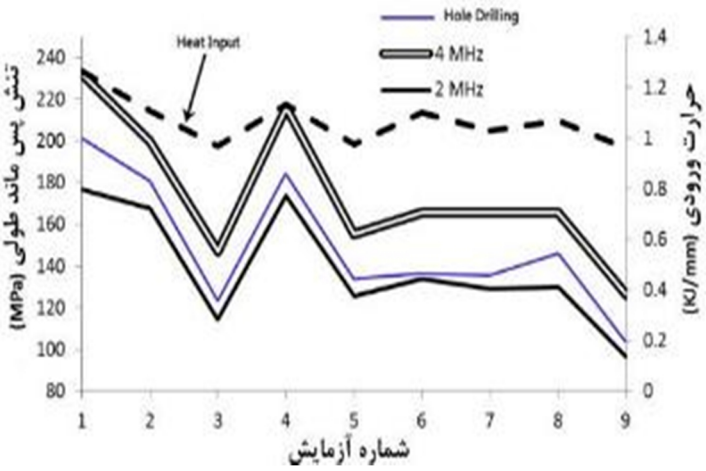
شکل4-محل انجام کرنش سنجی سوراخ بر روی نمونه های آزمایش

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-28]



شکل5- تنش‌های طولی حاصل از آزمون فراصوت برای نمونه‌های مختلف

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-28]



شکل 6- تنش های بیشینه اندازه گیری شده با پراب های 2 و4 مگاهرتز و مقایسه با حرارت ورودی

جهت مقایسه نتایج حاصل از اندازه گیری تنش پس ماند و همچنین مقایسه آن با حرارت ورودی، نتایج حاصله در یک نمودار نشان داده شده اند(شکل6).با توجه به شکل 6 مشاهده می شود هرجا که حرارت ورودی افزایش می یابد تنش نیز همراه با آن افزایش دارد. به این ترتیب نمونه هایی که دارای بالاترین حرارت ورودی هستند تنش کششی بالاتری نسبت به یکدیگر در خط مرکزی جوش دارند. نمودارهای مربوط به فرکانس 4 مگاهرتز در مجموع تنش کششی بالاتری را نسبت به نمودارهای اندازه گیری شده در فرکانس 2 مگاهرتز دارند. علت آن هم این است که هرچه فرکانس بالاتر می رود عمق تنش اندازه گیری شده نسبت به سطح نزدیکتر شده و افزایش می یابد. به همین دلیل با بالاتر رفتن گرادیان دمایی حوضچه جوش هنگام انجماد در دمای محیط اثرات انبساط و انقباض و در کل تغییرات تنش در این ارتفاع شدیدتر از مناطق دیگر است

در مورد تنش های اندازه گیری شده به روش سوراخ کاری نیز مشاهده می شود که تنش های اندازه گیری شده به تنش های اندازه گیری شده در فرکانس 2 مگا هرتز نزدیک تر می باشد.

همانگونه که توضیح داده شد علت این امر بدین دلیل بوده که با افزایش فرکانس تنش های اندازه گیری شده به تنشهای سطحی نزدیک تر شده و از آنجایی که روش سوراخ کاری روشی برای اندازه گیری تنش در عمق می باشد، اعداد بدست آمده به فرکانس2 مگاهرتز نزدیک تر می باشد.جهت تحلیل بهتر نتایج تنش پسماند از تحلیل سیگنال به نویز(S/N) با نسبت هر چه کمتر بهتر، استفاده شده است. نتایج حاصل از محاسبه S/N در جدول 4 آورده شده است

طبق جدول بالا مشاهده می‌شود که هرجا تنش بیشتر می‌شود حرارت ورودی نیز افزایش می‌یابد. شکل 5 این واقعیت را واضح‌تر بیان می‌کند. از نمودارها مشخص است که حالت بهینه موقعی است که مقادیر حاصله به استثنای فرکانس بیشترین باشد، یعنی مقادیر S/N میانگین بیشتر و حرارت ورودی نیز کمتر و به تبع آن تنش هم کاهش خواهد یافت.

حالت بهینه با توجه به آنالیز S/N حالت A3B3C3D1 بدست می آید. نکته مهمی که باید در نمودارهای پیش رو توجه داشت این است که روند نزولی نمودارها به معنای بدتر شدن وضعیت است چراکه نقطه بیشینه این نمودارها نشان دهنده وضعیت بهینه است بنابراین نمودارها فرم نزولی به خود گرفته‌اند. بر اساس تحلیل ANOVA نتایج نهایی و میزان درصد تاثیرات نشان می‌دهد که بیشترین درصد تاثیر متعلق به جریان زمینه است.

جدول5- مقادیر S/N برای تنش های محاسبه شده و یافتن سطح بهینه هر پارامتر در عمق 1/5 میلیمتر (فرکانس 4 مگاهرتز) به همراه حالت بهینه مقادیر بهینه پررنگتر از بقیه است

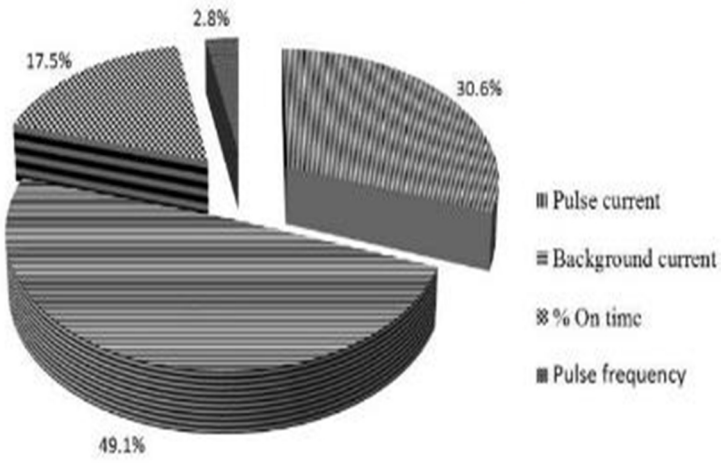
	پارامتر							
سطح	آمپراژ بیشینه A		آمپراژ زمینه B		درصد زمان آمپراژ بیشینه C		فرکانس D	
	تنش میانگین		تنش میانگین		تنش میانگین		تنش میانگین	
1	-43.53	(S/N)A1	-43.99	(S/N)B1	-43.24	(S/N)C1	**-42.21**	**(S/N)D1**
2	-43.10	(S/N)A2	-42.91	(S/N)B2	-42.96	(S/N)C2	-43.08	(S/N)D2
3	**-41.38**	**(S/N)A3**	**-41.12**	**(S/N)B3**	**-41.78**	**(S/N)C3**	-42.74	(S/N)D3

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-28]

جدول6- نتایج نهایی آنالیز واریانس جهت به دست آوردن درصد تاثیر هر کدام از پارامترها

	Sy	Sm	St	Se	Pe%	P_A%	P_B%	P_C%	P_D%
فرکانس ۲ مگاهرتز	179167	172907	6259	168	2.69	30.7	49.1	17.5	2.7
فرکانس ۴ مگاهرتز	284481	275135	9346	61	0.64	27.2	54.3	17.9	0.6

همان طور که از جدول 5 مشخص است این پارامتر تاثیر زیادی در حرارت ورودی دارد و به همین دلیل در تنش نهایی نیز بسیار تاثیرگذار بوده است. نکته جالب آن است که فرکانس درصد بسیار کمی هم در میزان تنش‌ها و هم در حرارت ورودی دارد و به همین دلیل شاید بتوان گفت در ایجاد تنش‌های پس-ماند بی تاثیر است. مطابقت فوق‌العاده نتایج با حرارت ورودی نشان می‌دهد که این عامل تاثیر به سزایی (مراجع و کارهای قبلی نیز این نتیجه‌گیری را تایید می‌کنند) در تنش دارد و هر کدام از پارامترهای پالسی که روی آن تاثیرگذار باشد بر روی تنش هم موثر خواهد بود. البته باید خاطر نشان کرد که به طور کلی در این تحقیق سرعت نازل جوش‌کاری ثابت گرفته شده است و تمامی نتایج در غیاب سرعت معتبر خواهند بود. با توجه به مطالب ذکر شده می توان تاثیر و درصد هر کدام از پارامترهای جوشکاری در تنش پس ماند قطعه را در شکل 7 مشاهده نمود.



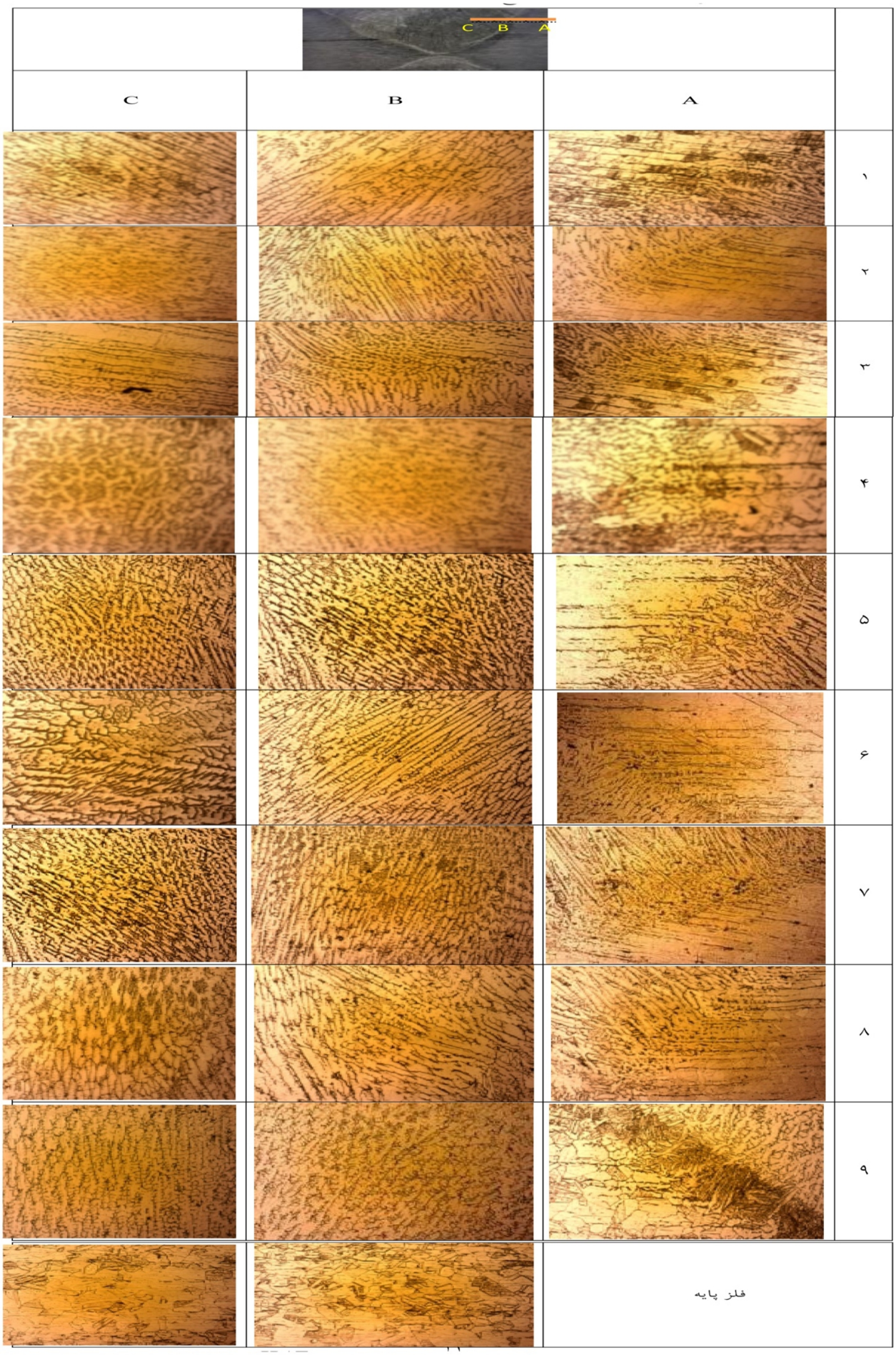
شکل7-تاثیر پارامترهای مختلف جوشکاری بر روی تنش پس ماند بر اساس تحلیل ANOVA

3-2- بررسی ریز ساختار

از تمامی نمونه ها، نمونه از مناطق HAZ، مرز بین جوش و حوضچه جوش و همچنین حوضچه جوش نمونه متالوگرافی تهیه شد و مورد ارزیابی با میکروسکوپ نوری قرار گرفت که نتایج آن در شکل 8 نمایش داده شده است. شایان ذکر است در تمامی نمونه‌های جوش شده، تصاویر فلز جوش تقریباً یکسانی با اندکی تغییر در اندازه دانه‌های جوش بدست آمده است. همان‌طور که در این شکلها مشاهده می‌شود، دانه‌های فلز جوش ریزتر از فلز پایه بوده که به علت نرخ سرد شدن می‌باشد که از خصوصیات جوشکاری TIG می‌باشد.در همه نمونه‌های جوش شده با پارامترهای مختلف جوشکاری، رشد اپی تکسیال در مرز جوش مشاهده می‌شود. همان‌طور که در این شکلها مشخص است، ساختار انجمادی مرز حوضچه که دانه‌های فلز پایه ذوب نشده در آن هستند، برای جوانه‌زنی دانه‌های ستونی فلز جوش به عنوان یک زیر لایه عمل می‌کنند به عبارت دیگر تمام دندریت‌هایی که از یک دانه رشد کرده‌اند در یک جهت قرار دارند، که این جهت از یک دانه تا دانه مجاور آن متفاوت است و رشدی موسوم به رشد اپی‌تکسیال را تشکیل داده‌اند. در مواد با ساختار بلوری fcc مانند همین آلیاژ، بدنه اصلی دندریت‌های ستونی یا سلول‌ها در جهت <100> رشد می‌کنند[17].

گرادیان دمایی(G) و نرخ رشد(R) دو پارامتر بسیار مهم برای پیش‌بینی ساختار انجمادی فلز جوش می‌باشند. تشکیل مورفولوژی ساختار انجمادی توسط نسبت G/R و اندازه ساختار انجمادی توسط نسبت G×R تعیین می‌شود. هرچه نسبت G/R کمتر باشد، تحت انجماد ترکیبی بیشتر بوده و ساختار حوضچه جوش به سمت تشکیل دانه‌های دندریتی

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-28]



شکل8-تصاویر ریز ساختار مناطق مختلف جوش در نمونه های مختلف از منطقه **HAZ** به مرکز جوش و تصاویر فلز پایه

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-28]

جدول 7-اندازه دانه ها در مناطق مختف جوش

شماره نمونه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	base
ضخامت دانه های ستونی (µT)	۱۷	۱۲	۱۰	۱۵	۱۰	۱۲	۱۳	۱۳	۱۱	
اندازه دانه های هم محور(µT)	۱۵	۱۵	۸	۱۳	۱۰	۱۱	۱۱	۱۲	۹	

می‌رود[17-19]. همان‌طور که در شکل 7 مشاهده می‌شود، با حرکت از خط ذوب قرار گرفته بروی مرز حوضچه به سمت خط جوش قرار گرفته وسط حوضچه جوش، حالت انجماد از حالت صفحه‌ای و سلولی در فصل مشترک فلز جوش-فلز پایه شروع می‌شود و با دور شدن از مرز ذوب، انجماد به حالت دندریتی ستونی تغییر می‌یابد.

برخی از سلول‌ها درون دندریت‌ها تشکیل شده و بازوهای جانبی آن‌ها مانع از رشد سلول‌های مجاور می‌گردند. همچنین در نزدیکی خط میانی جوش، دندریت‌های هم‌محور جوانه زده و رشد کرده‌اند و مانع رشد دندریت‌های ستونی گشته‌اند. این تغییرات حالت انجماد و منتهی شدن به دندریت‌های هم محور در وسط حوضچه جوش، در همه نمونه‌ها مشاهده شد فقط با این تفاوت که بر حسب پارامترهای مختلف جوش شده و در نتیجه ایجاد میزان تحت انجماد ترکیبی متفاوت برای هر نمونه، در مرز ذوب، رشد برای هر کدام از نمونه‌ها بیشتر یا به صورت دندریتی ستونی یا دندریتی هم‌محور یا سلولی آغاز می‌شود ولی همگی در وسط حوضچه جوش(خط میانی جوش) به دندریت‌های هم‌محور منتهی شده‌اند. این تغییر در حالت انجماد از مرز جوش تا وسط حوضچه جوش(مرز ذوب تا خط مرکزی جوش)، بدلیل تغییر گرادیان دمایی و نرخ انجماد از خط ذوب تا خط مرکزی جوش است.

با توجه به تصاویر می توان مشاهده نمود که در نمونه های شماره 1، 4، 6 و 8 اندازه دانه های ستونی و هم محور، نسبت به سایر نمونه ها کمی بیشتر بوده که با توجه به نمودار 5 می تـوان دریـافـت که این نمـونه ها دارای حـرارت ورودی بالاتری نسبت به سایر نمونه ها می باشند.همچنین نمونه های 3، 5 و 9اندازه دانه های ستونی و هم محور ریز بوده و بدلیل عدم استفاده از فلز پرکننده با ترکیب شیمیایی متفاوت از فلز پایه، ساختار بلوری فلز جوش و فلز پایه یکسان می‌باشد و ساختار دانه در نزدیکی خط ذوب جوش به صورت رشد اپی‌تکسیال مشاهده شد ولی در فواصل دورتر از مرز حوضچه جوش، دانه‌ها به رشد در جهت عمود بر مرز حوضچه که مصادف با بیشترین گرادیان است، تمایل دارند[19] اما از طرفی، دندریت‌های ستونی به رشد در جهت رشد آسان تمایل دارند. برای مواد با ساختار fcc مانند فولاد زنگ نزن AISI 304 و مواد با ساختار bcc، جهت رشد آسان <100> می‌باشد[17]. بنابراین همان‌طور که در شکل 8 نیز مشاهده می‌شود، در حین انجماد، دانه‌هایی که جهت رشد آسان آن‌ها عمود بر مرز حوضچه(جهت رشد آسان همسو با بیشترین گرادیان دمایی) باشد، به سهولت بیشتری رشد می‌کنند و دانه‌هایی که جهت‌گیری مناسبی ندارند از این رقابت حذف می‌شوند.



شکل9- نتایج استحکام کششی و سختی در نمونه های مختلف

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-28]

نتایج حاصل شده از تصاویر میکروسکوپ نوری از نمونه های مطابق با نتایج اندازه گیری تنش پس ماند و حرارت ورودی می باشد. همانگونه که مشاهده می گردد با افزایش حرارت ورودی ریز ساختار به سمت دانه های هم محور درشت تر میل پیدا نموده است و در این نمونه ها اندازه دانه های هم محور بالاتر می باشد. نتایج حاصل از اندازه گیری اندازه دانه ها در مناطق مختلف در جدول 7 نشان داده شده است.

3-3- نتایج سختی و کشش

نتایج حاصل از سختی و کشش نمونه ها در شکل 9 نمایش داده شده است.همانگونه که شکل 9 می توان مشاهده نمود تغییرات سختی و کشش با یکدیگر ارتباط مستقیمی از خود نشان می دهند. بیشترین استحکام کششی و سختی مربوط به نمونه شماره 3 و 9 بوده که در این نمونه ها تنش پس ماند و حرارت ورودی کمترین میزان خود می باشد همچنین مشاهده گردید که ریز ساختار در این نمونه نسبت به نمونه های مشابه دانه ریز می باشد. نتایج همچنین نشان داد که در همه نمونه‌ها، شکست در ناحیه‌ای بیرون از ناحیه حوضچه جوش و درون فلز پایه و یا مرز بین فلز پایه و جوش رخ داده است که این امر بیانگر حصول جوشی با خواص استحکامی مناسب بوده که علت این امر به ساختار انجمادی ریزتر فلز جوش برمی‌گردد.

4- نتیجه گیری

1- در تمامی سطوح پارامترهای پالسی که با آرایه استاندارد L9 تاگوچی ترتیب داده شده بود نقش حرارت ورودی انکار ناپذیر است.

2- با افزایش فرکانس تنش اندازه گیری شده در نمونه ها افزایش می یابد.

3- روند کلی به دست آمده از نمودارها با منطق توزیع تنش ها سازگاری دارد. یعنی در خط مرکزی جوش شاهد بیشینه تنش کششی هستیم و هرچه به منطقه تحت اثر حرارت می رسیم به تدریج با دور شدن از منطقه جوش به سمت صفر میل می کند.

4- نتایج حاصل بررسی ریز ساختار نشان می دهد که با حرکت از خط ذوب قرار گرفته بروی مرز حوضچه به سمت خط جوش قرار گرفته وسط حوضچه جوش، حالت انجماد از حالت صفحه‌ای و سلولی در فصل مشترک فلز جوش-فلز پایه شروع می‌شود و با دور شدن از مرز ذوب، انجماد به حالت دندریتی ستونی تغییر می‌یابد و همچنین در نمونه های دارای تنش پس ماند بالا بزرگ شدن دانه های هم محوری مرکزی بیشتر مشاهده می گردد.

5- نتایج حاصل از سختی و کشش و با حرارت ورودی و تنش پس ماند ارتباط مستقیمی داشته بگونه ای که با کاهش حرارت ورودی و کاهش تنش پی ماند سختی و کشش نیز افزایش یافته است.

منابع

1- D. Akbari, I. Sattari-Far. "Effect of the welding heat input on residual stresses in butt-welds of dissimilar pipe joints", International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 86, pp. 769–776, 2009.

2- P. J. Withers, H. K. D. H. Bhadeshia, "Residual stress Part 1 – Measurement techniques", Materials Science and Technology, Vol. 17, pp. 355-365,1982

3- P. Palanichamy, M. Vasudevan, T. Jayakumar, "Measurement of residual stresses in austenitic stainless steel weld joints using ultrasonic technique", Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 14, No. 2, pp. 166-171, 2009.

4- N.S. Rossini, M. Dassisti, K.Y. Benyounis, A.G. Olabi. "Methods of measuring residual stresses in components", Materials and Design, Vol. 35, pp. 572–588, 2012.

5-K.H. Tseng, C.P. Chou"The effect of pulsed GTA welding on thr residual stress of astainless steel weldment", Journal of material processing thechnology, Vol. 123, pp. 346-353, 2002.

6- T.L. Teng, P.H. Chang, Wen-Cheng Tseng. "Effect of welding sequences on residual stresses", Computers and Structures, Vol. 81, pp. 273–286, 2003.

7- A.K. Roy, A. Venkatesh, V. Marthandam, S.B. Dronavalli, Douglas Wells, and Ronald Rogge. "Residual Stress Characterization in Structural Materials by Destructive and Nondestructive Techniques", ASM International, Vol. 14, pp. 203-211, 2005.

8-S. Sadeghi, M. A. Najafabadi, Y. Javadi, MohammadjavadMohammadisefat ,"Using ultrasonic waves and finite element method to evaluate through-thickness residual stresses distribution in the friction stir welding of aluminum plates", Materials and Design, accepted paper, 2013.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-28]

9- S. Gachi, F. Belahcene ,F. Boubenider, "Residual stresses in AA7108 aluminium alloy sheets joined by friction stir welding",Nondestructive Testing and Evaluation,Vol. 24, No. 3,pp. 301–309, 2009.
10- H. Lu, X. S. Liu, J. G. Yang, S. P. Zhang, H. Y. Fang ,"Ultrasonic stress evaluation on welded plates with Lcr wave", Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 13,No. 1, pp. 71– 74, 2008.
11- ASTM Standard, Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method, ASTM, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.
12- P. Palanichamy, M. Vasudevan, T. Jayakumar, "Measurement of residual stresses in austenitic stainless steel weld joints using ultrasonic technique", Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 14, No. 2, pp. 166-171, 2009.
13-S. Gachi, F. Belahcene ,F. Boubenider, "Residual stresses in AA7108 aluminium alloy sheets joined by friction stir welding",Nondestructive Testing and Evaluation,Vol. 24, No. 3,pp. 301–309, 2009.
14- Y. Javadi, M. A. Najafabadi"Comparison between contact and immersion ultrasonic method to evaluate welding residual stresses of dissimilar joints", Materials and Design, Vol. 47, pp. 473 –482, 2013.
15- Y. Javadi, M. Akhlaghi, M. A. Najafabadi. "Using finite element and ultrasonic method to evaluate welding longitudinal residual stress through the thickness in austenitic stainless steel plates", Materials and Design, Vol. 45, pp. 628–642, 2013.
16- Y. Javadi, H. S. Pirzaman , M. H. Raeisi, M. A. Najafabadi ,"Ultrasonic inspection of a welded stainless steel pipe to evaluate residual stresses through thickness", Materials and Design, Vol. 49, pp. 591–601, 2013.
17- M. Yousefieh, M. Shamanian, A. Saatchi ,"Optimization of the pulsed current gas tungsten arc welding (PCGTAW) parameters for corrosion resistance of super duplex stainless steel (UNS S32760) welds using the Taguchi method", Journal of Alloys and Compounds, Vol. 510, pp. 71– 77, 2012.
18- P. K. Giridharan, N. Murugan ,"Optimization of pulsed GTA welding process parameters for the welding of AISI 304L stainless steel sheets", Int J AdvManufTechnol, Vol. 40, pp. 478–489, 2009.
19- M Yousefieh, M Shamanian, A Saatchi, "Influence of Heat Input in Pulsed Current GTAW Process on Microstructure and Corrosion Resistance of Duplex Stainless Steel Welds", Journal of Alloys and Compounds, Vol. 510, pp. 71– 77, 2012.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-28]