

بررسی تأثیر پارامترهای فرایند جوشکاری قوسی تنگستن-گاز با جریان ضربانی بر خواص اتصال فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI 321

محمد قلم باز^۱، مرتضی شمعانیان^۱، عبدالمجید اسلامی^{۱*}، محمد عبداللهی^۱ و ابراهیم عبدالوند^۲

۱- دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۲- مهندس مکانیک، شرکت پالایش نفت اصفهان، اصفهان، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۵/۱۹ - دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۱/۵/۴)

چکیده- در این پژوهش، خواص اتصال فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۲۱ از دیدگاه ریزساختاری، مکانیکی و خوردگی مورد بررسی قرار گرفته شده است. به منظور دستیابی به عامل‌های بهینه فرایند جوشکاری قوسی تنگستن-گاز با جریان ضربانی (PCGTAW) از روش طراحی آزمایش تاگوچی استفاده شده است. در این فرایند جوشکاری، جریان ضربان در سه سطح ۱۲۰، ۱۴۰ و ۱۶۰ آمپر، جریان زمینه در سطح‌های ۴۰، ۵۰ و ۶۰ آمپر، بسامدهای ۲، ۵ و ۷ هرتز و درصد روشن بودن ضربان ۳۰، ۵۰ و ۷۰ انتخاب شد. از آرایه متعامد L_۹ روش تاگوچی برای طراحی آزمایش استفاده شد. مقاومت به خوردگی در محیط ۱ مولار H₂SO₄ توسط آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک چرخه‌ای در دمای اتاق ارزیابی شد. به منظور دستیابی به شرایط بهینه چگالی جریان رویین شدن (A/cm²)، مشخصه کیفی هر چه کمتر بهتر (Low is Better: LB) انتخاب شد. شرایط بهینه هنگامی حاصل شد که جریان زمینه و جریان ضربان ۵۰ و ۱۴۰ آمپر، بسامد ۵ هرتز و درصد روشن بودن ضربان ۵۰ بود. تحت شرایط بهینه لگاریتم چگالی جریان رویین شدن ۴/۵ (A/cm²) حاصل شد. از سوی دیگر آنالیز واریانس نشان داد که درصد زمان روشن بودن ضربان برابر با ۳۶ و جریان زمینه برابر با ۴۶ آمپر، تأثیر گذارترین عامل‌ها بر چگالی جریان رویین شدن اتصال فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۲۱ با استفاده از فرایند PCGTAW هستند. ارزیابی خواص مکانیکی توسط آزمون سنبه برشی انجام شد. خواص مکانیکی هر یک از نمونه‌ها در محدوده مطلوب قرار داشت. در شرایط بهینه بیشینه نیروی برشی و استحکام به ترتیب برابر با ۳۲۰۰ N و ۶۱۲ MPa بود. سطح شکست نمونه‌های آزمون سنبه برشی شامل دو ناحیه تغییر فرم برشی و ناحیه شکست بود. همچنین بررسی‌ها نشان داد که مهم‌ترین عامل تأثیرگذار بر خواص اتصال فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۲۱ حرارت ورودی است.

واژه‌های کلیدی: فولاد زنگ‌نزن آستنیتی، جوشکاری قوسی تنگستن-گاز با جریان ضربانی، روش تاگوچی، آزمون سنبه برشی، آزمون خوردگی پتانسیودینامیک.

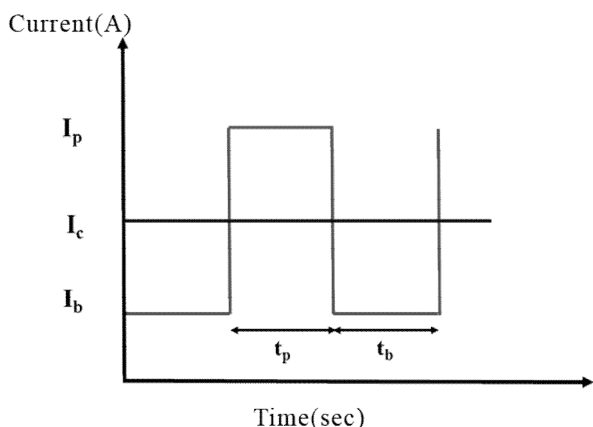
۱- مقدمه

مقاومت به خزش و مقاومت به خوردگی بین‌دانه‌ای می‌توانند

در دماهای بالا استفاده شوند [۱-۳]. در موارد استفاده در

فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی تثبیت شده نظیر ۳۲۱ و ۳۴۷ به دلیل

* :مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: m.eslami@cc.iut.ac.ir



شکل ۱- نوع جریان در فرایند جوشکاری قوسی تنگستن - گاز با جریان ضربانی و جریان ثابت [۱۷].

متفاوت است. برای به دست آوردن حرارت ورودی هنگام استفاده از جریان ضربانی باید به متغیرهای تأثیر گذار بر حرارت ورودی دقت کرد. متغیرهای مؤثر بر حرارت ورودی فرایند در حالت با جریان ضربانی شامل جریان ضربان، جریان زمینه، درصد زمان، سرعت جوشکاری و راندمان جوشکاری است. این در حالی است که در حالت با جریان ثابت، جریان اعمالی، سرعت و راندمان جوشکاری متغیرهای تأثیر گذار هستند. حرارت ورودی با استفاده از رابطه‌های (۱ و ۲) معرفی شده در ذیل محاسبه می‌شوند [۱۷].

$$I_m = (I_p \cdot t_p + I_b \cdot t_b) / (t_p + t_b) \quad (1)$$

$$H.I = I_m \times V/S \quad (2)$$

در این روابط I_p نمایانگر جریان ضربان، I_b جریان زمینه، I_m جریان متوسط، F بسامد، t_p و t_b درصد زمان، V ولتاژ و S سرعت جوشکاری است. میزان همپوشانی و شکل مهره جوش به سرعت جوشکاری و بسامد اعمال جریان بستگی دارد. در فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی، جوشکاری GTAW با استفاده از جریان ضربانی باعث بهبود شکل مهره جوش و خواص مکانیکی و خوردگی می‌شود [۱۶-۱۸]. پژوهش‌های انجام شده نشان داده است که استفاده از جریان ضربانی باعث افزایش خواص مکانیکی اتصال مشابه فولاد زنگ‌نزن آستنیتی 304L شده است [۱۹-۲۰]. در این راستا تأثیر استفاده از جریان ثابت

محدوده دمایی حساس شدن (۴۵۰-۸۵۰ درجه سانتی‌گراد)، این نوع فولادها در دماهای بالا حرارت داده می‌شوند تا رسوبات کاربید تیتانیوم تشکیل شوند. این رسوبات دارای دو نقش عمده هستند [۷-۳]. یکی جلوگیری از حساس شدن و خوردگی بین دانه‌ای و دیگری بهبود مقاومت به خزش فولاد در دمای بالا. با توجه به کاربرد فراوان فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۲۱ در صنایع هسته‌ای و پتروشیمی و همچنین استفاده از جوشکاری برای اتصال و تعمیر قطعات مورد استفاده از این فولاد، بررسی خواص اتصال آن از اهمیت بالایی برخوردار است [۷-۱۲].

استفاده از روش‌های جدید در فرایند اتصال مواد و آلیاژها گسترش یافته است. فرایند جوشکاری ذوبی با بهره‌گیری از نوع جریان ضربانی جایگزین نوع جریان ثابت آن شده است. جریان در این نوع به صورت چرخه‌ای در یک سطح بالا و سطح پایین جریان تغییر می‌کند. استفاده از فرایند $PCGTAW^1$ موجب استفاده بهینه از انرژی قوس الکتریکی، کاهش اتلاف حرارت، کاهش ناحیه متأثر از حرارت و کاهش تنش‌های باقیمانده می‌شود [۱۳-۱۵].

فرایند $PCGTAW$ روش ارتقاع یافته نوع جوشکاری قوسی تنگستن - گاز با جریان ثابت ($CCGTAW^2$) است. در این فرایند، جریان به صورت چرخه‌ای با یک بسامد تغییر می‌کند. جریان به صورت متناوب بین سطح بالا (جریان ضربان) و سطح پایین (جریان زمینه) در مدت زمان زیاد یا کم اعمال می‌شود. در هنگام اعمال جریان ضربان (I_p^3) قطعه کار ذوب می‌شود و با اعمال جریان زمینه I_b^4 حرارت وارد شده بر حوضچه مذاب کاهش می‌یابد و موجب سرد و منجمد شدن مذاب می‌شود. به طور کلی روش GTAW با جریان ضربانی مشخصه‌های قوس مناسب از جریان بالا و حرارت ورودی کم از جریان پایین را با هم ترکیب می‌کند. طرح کلی تغییرات جریان ضربان و زمینه در شکل (۱) نشان داده شده است [۱۸-۱۶].

نحوه محاسبه حرارت ورودی در فرایند جوشکاری قوسی تنگستن - گاز با جریان ضربانی نسبت به حالت با جریان ثابت

جدول ۱- ترکیب شیمیایی مواد مصرفی بر حسب درصد وزنی.

عناصر	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Ti	S	Nb	Fe
AISI ۳۲۱	۰/۰۸	۰/۳	۰/۹	۱۲/۷	۱۶/۵	۰/۳	۰/۱	۰/۰۳	-	۶۶/۴
ER ۳۴۷	۰/۰۵	۰/۳	۱/۸	۱۱	۱۹	۰/۱	-	۰/۰۳	۰/۸	۶۶

و ضربانی در فرایند جوشکاری قوسی تنگستن - گاز بر خواص مکانیکی و ریزساختاری اتصال غیر مشابه فولاد زنگ‌نزن آستنیتی بررسی شده است [۲۳-۲۱]. در این پژوهش‌ها مشاهده شده است که استفاده از نوع ثابت و ضربانی نقش مهمی در تغییر خواص متالورژیکی و مکانیکی دارد. استفاده از فرایند PCGTAW موجب بهبود خواص کششی اتصال نسبت به فرایند CCGTAW شده است [۲۴]. همچنین رامکومار و همکاران [۲۵] به مقایسه استفاده از جریان ضربانی با بسامد بالا و پایین بر نسبت ابعادی مهره جوش اتصال فولاد زنگ‌نزن آستنیتی 304L پرداخته‌اند که نشان داده شد نفوذ جوش کامل در ضربان بسامد بالا مشاهده می‌شود. همچنین در این حالت، درصد زمان روشن بودن ضربان تأثیر گذارترین عامل بر هندسه مهره جوش بود در حالی که در حالت ضربان با بسامد پایین، بسامد تأثیر گذاری بیشتری داشته است.

راهول و همکاران [۲۶] به بررسی تأثیر حرارت ورودی بر ریزساختار، تنش پسماند و مقاومت به خوردگی اتصال فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴L پرداخته‌اند. مشاهدات ریزساختاری بر روی نمونه‌های با ضخامت ۱۰ mm و ۶ mm نشان داده است که ضخامت مرز جوش با افزایش حرارت ورودی افزایش می‌یابد. برای نمونه با ضخامت ۱۰ mm، در بیشترین حرارت ورودی مورفولوژی اسکلتی فریت دلتا مشاهده شده است. با افزایش حرارت ورودی، ضخامت و پهنای دندریت‌ها افزایش یافته است. همچنین هیچ گونه حساسیتی در منطقه متأثر از حرارت مشاهده نشده است. کاهش ضخامت نمونه جوشکاری شده باعث بارزتر شدن منطقه متأثر از حرارت و رشد دانه شده و مقدار فریت فلز جوش نیز افزایش ۲ تا ۵ درصدی داشته و نمونه با ضخامت کمتر دارای چگالی حفرات بیشتری بوده است [۲۷].

با توجه به مطالعات و تحقیقات انجام شده، اتصال فولاد زنگ-نزن آستنیتی ۳۲۱ به دلیل کاربرد فراوان در صنعت به خصوص صنعت نفت، گاز و پتروشیمی از اهمیت بسزایی برخوردار است. مرور مطالعات انجام شده نشان داد که پژوهش‌های خاصی در رابطه با اتصال این نوع از فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی صورت نگرفته است. بنابراین در این مقاله سعی بر آن است که به بررسی خواص اتصال این آلیاژ از لحاظ خواص مکانیکی و خوردگی پرداخته شود. برای دستیابی به این مهم از طراحی آزمایش تاگوچی جهت دستیابی به عامل‌های بهینه فرایند PCGTAW بهره گرفته می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

در این تحقیق از فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۲۱ AISI به ضخامت ۵ میلی‌متر به عنوان فلز پایه استفاده شده است. فلز پرکننده به منظور اتصال‌دهی از نوع ER ۳۴۷ بود. جدول (۱) ترکیب شیمیایی مواد مورد استفاده در این پژوهش را ارائه می‌دهد. از روش تاگوچی به منظور طراحی آزمایش‌ها استفاده شد. طرح آزمایش در روش تاگوچی بر اساس فاکتوریل جزئی است و به همین دلیل تعداد آزمایشات به طرز چشم‌گیری کاهش می‌یابد. انتخاب آرایه متناسب بستگی به تعداد فاکتورهای قابل کنترل و سطوح مورد نظر دارد. چهار فاکتور شامل جریان ضربان، جریان زمینه، فرکانس ضربان و درصد قرارگیری جریان ضربان در یک دوره در سه سطح برگزیده شد که در جدول (۲) ملاحظه می‌شود. درجه آزادی کل در یک آرایه متعامد باید بیشتر از تعداد پارامترها و یا حداقل برابر آن باشد. در این مطالعه درجه آزادی کل برابر ۸ است. بر اساس طرح تاگوچی، آرایه متعامد L_8 به صورت نشان داده شده در جدول (۳) انتخاب شد. با انتخاب

جدول ۲- متغیرها و اندازه آنها بر حسب سطوح مربوطه.

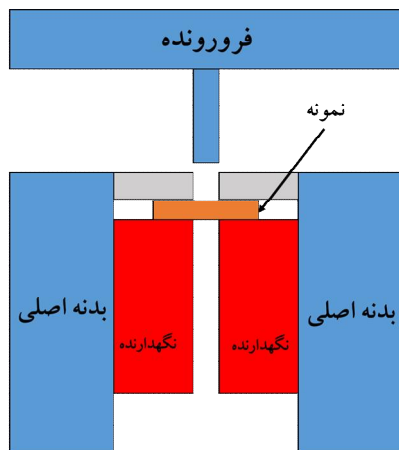
متغیر	علامت	سطح		
		۱	۲	۳
جریان ضربان (A)	A	۱۲۰	۱۴۰	۱۶۰
جریان زمینه (A)	B	۴۰	۵۰	۶۰
فرکانس ضربان (Hz)	C	۲	۵	۷
% on time	D	۳۰	۵۰	۷۰

جدول ۳- آرایه متعامد L_۹ با استفاده از روش تاگوچی با استفاده از متغیرهای آرایه شده در جدول ۲.

شماره آزمایش	کد نمونه	متغیر			
		D	C	B	A
۱	TCP-۱	۱	۱	۱	۱
۲	TCP-۲	۲	۲	۲	۱
۳	TCP-۳	۳	۳	۳	۱
۴	TCP-۴	۲	۲	۱	۲
۵	TCP-۵	۳	۳	۲	۲
۶	TCP-۶	۱	۱	۳	۲
۷	TCP-۷	۳	۳	۱	۳
۸	TCP-۸	۱	۱	۲	۳
۹	TCP-۹	۲	۲	۳	۳

مطلوب از مشخصه کیفی LB استفاده شد. به منظور انجام فرایند جوشکاری ذوبی، قطعات جدا شده از فلز پایه به ضخامت ۵، طول ۱۰۰ و عرض ۵۰ میلی متر جدا شد و با زاویه تقریباً برابر با ۳۵ درجه لبه‌سازی شدند. همچنین در این تحقیق از طرح اتصال جناغی یک طرفه با زاویه پخ ۷۰ درجه و پاشنه اتصال ۱/۵ میلی متر استفاده شد. قبل از انجام جوشکاری به منظور حذف اکسیدها و آلودگی‌های سطحی، سطح نمونه‌ها برس‌زنی و با محلول استون شستشو داده شدند. سپس جوشکاری ذوبی نمونه‌ها در حالت جریان مستقیم و قطبیت منفی با دو روش CCGTAW و PCGTAW با استفاده از دستگاه جوش نوع گام الکتریک ساخت ایران و تحت لیسانس مرکز آلمان انجام شد. جوشکاری در جهت موازی راستای نورد صورت گرفت و بدین منظور از الکتروود مصرف نشدنی تنگستنی حاوی ۲ درصد

آرایه متعامد L_۹، تعداد آزمایش‌ها از ۸۱ عدد به ۹ عدد کاهش یافت و در مصرف ماده اولیه و هزینه‌های عملیاتی به مقدار قابل توجهی صرفه‌جویی شد. شرایط بهینه بر اساس نتایج نسبت سیگنال به نویز (S/N) تعیین شد. اساساً سه نوع نسبت سیگنال به نویز را می‌توان با توجه به مشخصه کیفی مورد نظر انتخاب کرد که عبارتند از: هر چه بیشتر بهتر (HB)، هر چه کمتر بهتر (LB) و اندازه اسمی بهتر (NB). بزرگترین نسبت S/N مربوط به بهترین عملکرد است. از آنجایی که هدف از این تحقیق دستیابی به خواص مکانیکی و خوردگی مطلوب و بیشینه است، هر کدام از رفتارهای مکانیکی و خوردگی به صورت جداگانه بررسی شدند. برای رسیدن به بیشترین مقاومت به خوردگی، بیشترین انرژی ضربه، بیشترین استحکام برشی از مشخصه کیفی HB استفاده شد و جهت رسیدن به نسبت ابعادی^۵ اتصال



شکل ۲- طرح کلی از سیستم آزمون سنبه برشی.

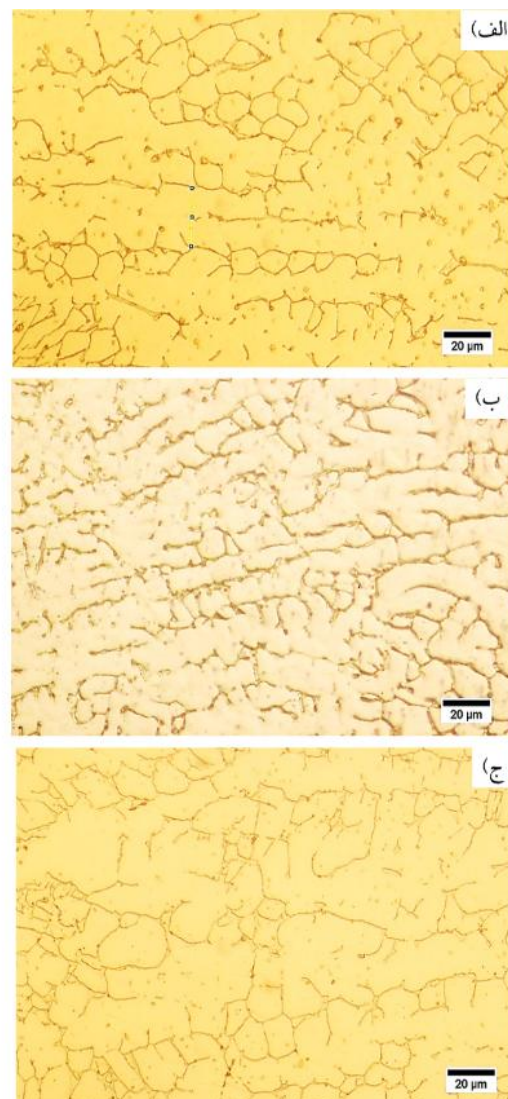
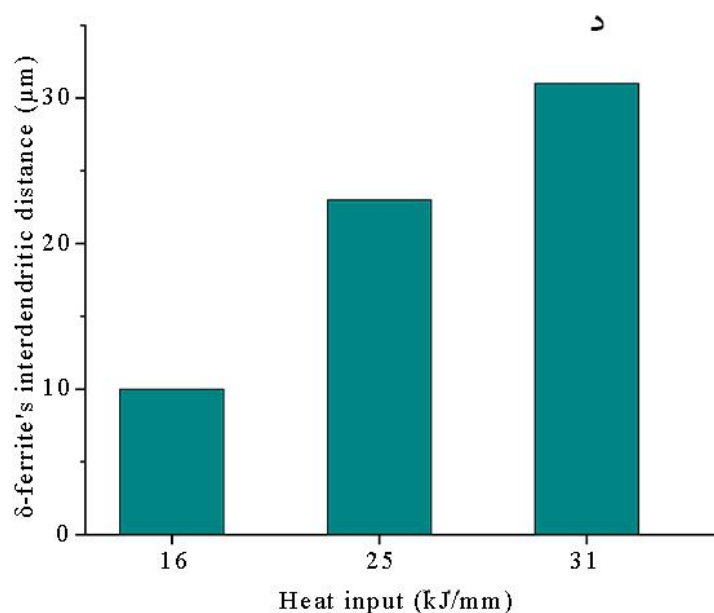
نگهدارنده و بدنه اصلی است. در آزمون ریزسختی سنجی از دستگاه ریزسختی سنجی ویکرز (HV) استفاده شد. فرورونده این دستگاه از نوع هرم مربع القاعده الماسی با زاویه سطح جانبی ۱۳۶ درجه بود. در این آزمون بار اعمالی به میزان ۳۰۰ گرم به مدت ۱۰ ثانیه تنظیم شد. کلیه آزمون‌ها سه بار تکرار شد تا از تکرار پذیری نتایج اطمینان حاصل شود و در انتها میانگین نتایج به دست آمده محاسبه شد. لازم به ذکر است که تمامی آزمون‌ها در دمای اتاق انجام شدند.

آزمون‌های خوردگی پلاریزاسیون چرخه‌ای به منظور بررسی رفتار خوردگی هر یک از اتصال‌ها در دمای محیط و محلول یک مولار سولفوریک اسید با استفاده از دستگاه PARSTAT 2273 انجام شد. این آزمون بر اساس سامانه سه الکترودی که شامل الکتروود مرجع از نوع Ag/AgCl، الکتروود کمکی و الکتروود کاری (نمونه آماده شده از اتصال) انجام شد. به منظور نزدیک بودن شرایط آزمون به شرایط حقیقی نمونه‌های آماده شده از اتصال ایجاد شده شامل فلز جوش و فلز پایه بود. همچنین نمونه‌ها به نحوی آماده گشتند که ریشه اتصال با محلول خورنده در تماس باشد. نمونه‌ها پس از ایجاد اتصال با سیم مسی مانت شدند و سپس سنباده زنی و صیقلی شدند. در این آزمون ۲۰ دقیقه پس از قرارگیری نمونه در محلول آزمون، روبش از پتانسیل ۱۵۰ میلی‌ولت کمتر از ولتاژ مدار باز با نرخ ۱ میلی‌ولت بر ثانیه در جهت رفت آغاز شد و تا پتانسیل ۱۲۰۰

توریم به قطر ۲/۴ میلی‌متر استفاده شد. در طول جوشکاری از گاز آرگون با خلوص ۹۹/۹۹ درصد به عنوان گاز محافظ و گاز پشتی هر کدام با دبی تقریبی ۱۲ لیتر بر دقیقه به منظور جلوگیری از اکسید شدن سطح و ریشه جوش استفاده شد. از فلز پرکننده به ضخامت ۲/۴ استفاده شد و فرایند جوشکاری با انجام دو گذر برای هر نمونه به پایان رسید. حرارت ورودی بر اساس رابطه (۳) برای هر گذر جداگانه حساب شد [۱۵]:

$$HI = \eta (V \times I) / S \quad (3)$$

در رابطه بیان شده، HI حرارت ورودی بر اساس ژول بر میلی‌متر، η بازده جوشکاری که در روش جریان ثابت ۰/۶ و در روش جریان ضربانی ۰/۷ در نظر گرفته شد، V ولتاژ بر حسب ولت، I جریان (برای حالت جریان ضربانی، جریان متوسط) بر حسب آمپر و S سرعت جوشکاری بر حسب میلی‌متر بر ثانیه هستند. لازم به ذکر است که انتخاب متغیرهای جوشکاری بر اساس تحقیقات انجام شده و انجام یک آزمایش اولیه است. پس از فرایند جوشکاری، نمونه‌هایی از قطعات جوشکاری شده تهیه شد. به منظور بررسی‌های ریزساختاری، تعدادی از نمونه‌ها مانت شدند و سپس سطح نمونه‌ها با استفاده از کاغذ سنباده‌های ۸۰، ۱۲۰، ۳۲۰، ۶۰۰، ۱۲۰۰ و ۲۴۰۰ سنباده‌زنی و سپس با محلول آب مقطر حاوی پودر آلومینا پولیش شدند. از محلول ۳۰ درصد نیتریک اسید در ولتاژ ۴ ولت و زمان ۲۰ ثانیه جهت حکاکی الکتریکی نمونه‌ها استفاده شد، سپس ریزساختار نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفت. جهت بررسی رفتار مکانیکی اتصال‌های ایجاد شده از آزمون‌های مکانیکی ضربه، ریزسختی سنجی و سنبه برشی استفاده شد. در آزمون ضربه نمونه‌ها طبق استاندارد ASTM E23-12 بر اساس نوع شیار V شکل آماده شد. آزمون سنبه برشی طبق استاندارد ASTM 643 انجام شد. نمونه‌های این آزمون با ضخامت ۰/۵ میلی‌متر آماده‌سازی شد و پس از آزمون سطح شکست با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل Philips XL30 بررسی شد. شکل (۲) طرح کلی از سیستم آزمون سنبه برشی را نشان می‌دهد که شامل فرو رونده،



شکل ۳- ریزساختار فلز جوش نمونه‌های جوشکاری شده با حرارت ورودی‌های مختلف تحت فرایند PCGTAW. (الف) حرارت ورودی ۱۶ kJ/mm، (ب) ۲۵ kJ/mm، (ج) ۳۱ kJ/mm. (د) متوسط اندازه فاصله بین دندریت‌های فریت دلتا در نمونه‌های جوشکاری شده با حرارت‌های ورودی متفاوت.

حرارت ورودی‌های ۱۶، ۲۵ و ۳۱ کیلو ژول بر میلی‌متر را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل مشخص است با افزایش حرارت ورودی ساختار فلز جوش از دانه‌های هم‌محور ظریف و ریز به دانه‌های ستونی درشت تغییر می‌کند. با استفاده از نرم افزار ImageJ فاصله بین فریت دلتای تشکیل شده در مرکز فلز جوش اندازه‌گیری شد. فاصله متوسط بین فریت دلتای تشکیل شده در فضای بین دندریت‌ها با مورفولوژی اسکلتی برای نمونه با حرارت ورودی بیشینه برابر با ۳۰ میکرون، برای نمونه با

میلی‌ولت ادامه یافت و در ادامه جهت روبش تغییر کرد و با همان نرخ تنظیم شده روبش تا پتانسیل ابتدایی ادامه یافت. آزمون‌های خوردگی سه مرتبه تکرار شد تا از تکرارپذیری آزمون اطمینان حاصل شود.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی‌های ریزساختاری

شکل (۳) ریز ساختار فلز جوش نمونه‌های جوشکاری شده با

جدول ۴- نتایج حاصل از آزمون سنبه برشی و محاسبه استحکام کششی هر یک از نمونه‌ها.

آزمایش	کد نمونه	بیشینه نیروی برشی (N)	تنش برشی بیشینه (MPa)	استحکام کششی (MPa)	حرارت ورودی (kJ/mm)	درصد تغییر حرارت ورودی به آزمایش ۱
۱	۱TCP-	۳۰۰۰	۳۱۷	۵۷۲	۱۶	۰
۲	۲TCP-	۳۳۰۰	۳۳۵	۶۳۰	۲۲	۳۸
۳	۳TCP-	۳۱۵۰	۳۵۰	۶۰۲	۲۶	۶۳
۴	۴TCP-	۳۰۸۰	۳۲۷	۵۸۸	۲۳	۴۴
۵	۵TCP-	۳۱۳۸	۳۳۳	۶۰۰	۲۹	۸۱
۶	۶TCP-	۳۰۸۵	۳۲۸	۵۹۰	۲۱	۳۱
۷	۷TCP-	۳۰۶۰	۳۲۵	۵۸۴	۳۱	۹۴
۸	۸TCP-	۳۲۰۰	۳۴۰	۶۱۱	۲۱	۳۱
۹	۹TCP-	۲۹۰۰	۳۰۸	۵۵۴	۲۸	۷۵

استحکام تسلیم کششی می‌توان از رابطه‌های زیر استفاده کرد [۶].

$$\tau = \frac{P}{2\pi r t} \quad (۴)$$

$$\sigma_y = a\tau_{0.02} \quad (۵)$$

$$\sigma_{UTS} = b\tau_{USS} \quad (۶)$$

که در رابطه‌های فوق، τ نشان‌دهنده تنش برشی، P برابر با فشار اعمالی، r و t به ترتیب قطر پانچ و ضخامت نمونه هستند. σ_y نشان‌دهنده استحکام تسلیم، σ_{UTS} نشان‌دهنده استحکام کششی است و همچنین $\tau_{0.02}$ و τ_{USS} به ترتیب برابر با مقادیر استحکام برشی تسلیم و بیشینه استحکام برشی نمونه در نمودار تنش برشی حاصل از آزمون سنبه برشی هستند. از طرفی a و b دو مقدار ثابت و به ترتیب برابر $1/77$ و $1/8$ هستند. همان‌طور که از جدول (۴) مشخص است، در تمامی نمونه‌ها استحکام کششی مطلوب حاصل شده است. از جمله عوامل مؤثر بر استحکام یک آلیاژ، اندازه دانه است. هر چه ساختار ریزدانه‌تر باشد، مطابق با رابطه هال-پچ استحکام آلیاژ افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که در فرایند جوشکاری حرارت ورودی بیشترین تأثیر را بر اندازه دانه دارد. افزایش حرارت ورودی منجر به کاهش سرعت سرد شدن و در نتیجه رشد دانه‌ها می‌شود.

حرارت ورودی متوسط برابر با 23 میکرون و برای نمونه با حرارت ورودی کمینه برابر با 10 میکرون اندازه‌گیری شد. افزایش حرارتی ورودی باعث افزایش فاصله اسکلت‌های فریتی شده است به گونه‌ای که افزایش 56 و 94 درصدی حرارت ورودی به نمونه‌های جوشکاری شده منجر به افزایش 130 و 200 درصدی فاصله بین فریت دلتا شده است. با توجه پژوهش‌های قبلی اعمال جریان ضربانی به مذاب با دمای پایین‌تر تأثیر بیشتری نسبت به مذاب‌های با دمای بالاتر دارد [۱۷-۱۹]. بنابراین می‌توان دریافت که در حرارت ورودی-های بالا که دمای فلز جوش افزایش می‌یابد، از تأثیر اعمال جریان ضربانی کاسته می‌شود.

۳-۲- استحکام برشی

جدول (۴) مقادیر استحکام برشی و استحکام کششی محاسبه شده با استفاده از روابط (۴) و (۶) را نشان می‌دهد. در این روابط، رابطه بین استحکام کششی و استحکام برشی به صورت خطی بیان شده است و می‌توان تحلیل‌های صورت گرفته برای بیشینه نیروی برشی و استحکام برشی را به استحکام کششی تعمیم داد. برای تبدیل نیروی برشی به تنش برشی، بیشینه استحکام برشی به استحکام کششی و استحکام تسلیم برشی به

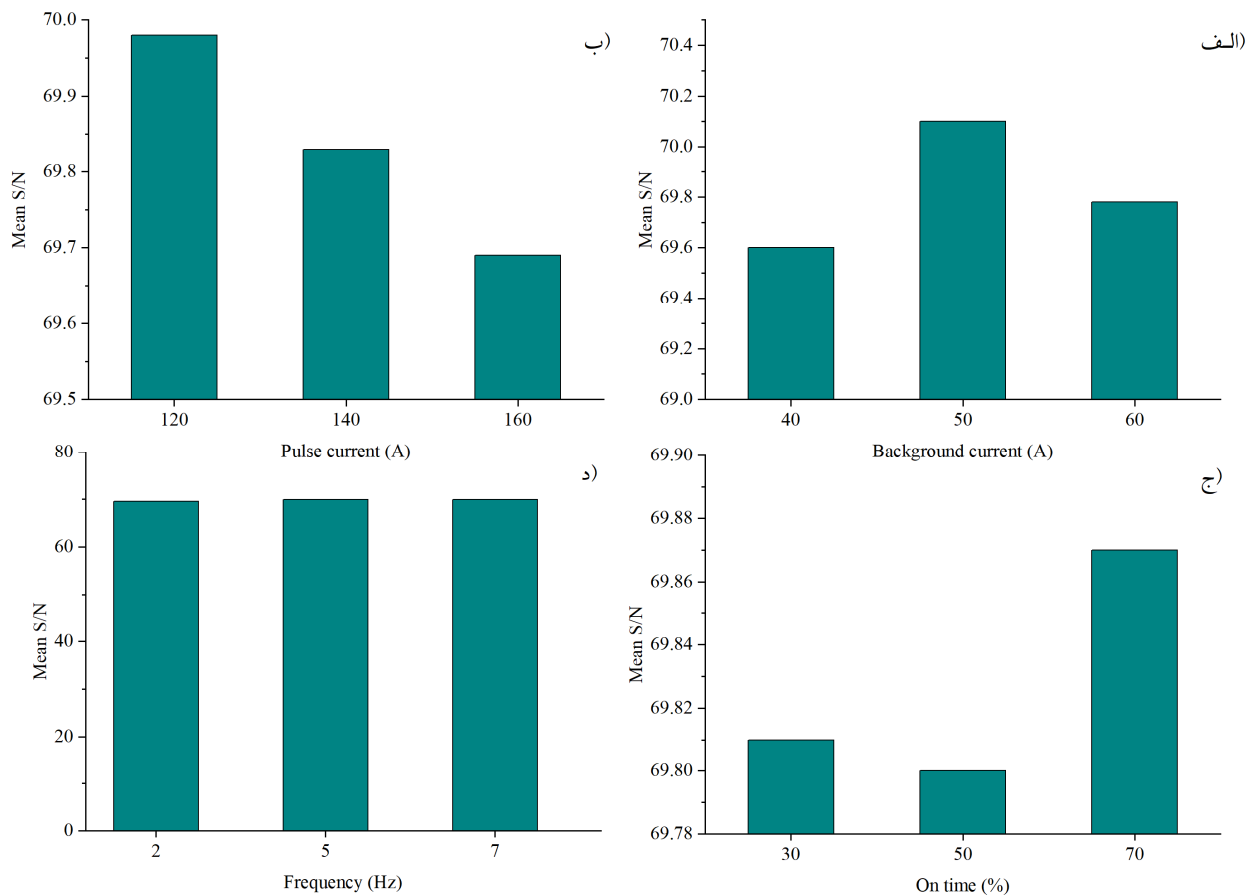
جدول ۵- متوسط S/N محاسبه شده برای هر یک از آزمایش‌ها در فرایند PCGTAW

آزمایش	کد نمونه	درصد زمان	بسامد (Hz)	جریان ضریان (A)	جریان زمینه (A)	تنش برشی	متوسط S/N
۱	TCP-۱	۳۰	۲	۱۲۰	۴۰	۳۰۰۰	۶۹/۵۴
۲	TCP-۲	۵۰	۲	۱۲۰	۵۰	۳۳۰۰	۷۰/۳۷
۳	TCP-۳	۷۰	۷	۱۲۰	۶۰	۳۱۵۰	۶۹/۹۷
۴	TCP-۴	۵۰	۷	۱۴۰	۴۰	۳۰۸۰	۶۹/۷۷
۵	TCP-۵	۷۰	۲	۱۴۰	۵۰	۳۱۳۸	۶۹/۹۳
۶	TCP-۶	۳۰	۵	۱۴۰	۶۰	۳۰۸۵	۶۹/۷۹
۷	TCP-۷	۷۰	۵	۱۶۰	۴۰	۳۰۶۰	۶۹/۷۱
۸	TCP-۸	۳۰	۷	۱۶۰	۵۰	۳۲۰۰	۷۰/۱۰
۹	TCP-۹	۵۰	۲	۱۶۰	۶۰	۲۹۰۰	۶۹/۲۵

می‌شود کاهش مقدار فریت از ۲۳ درصد به ۱۸ درصد، افزایش استحکام کششی و بیشینه نیروی برشی را به همراه داشته است. در مورد نمونه TCP-۷ و TCP-۹ که حرارت ورودی به نسبت نمونه TCP-۲ به میزان ۳۰ و ۴۰ درصد افزایش یافته است، استحکام کششی و بیشینه نیرو کاهش یافته‌اند. مقدار فریت موجود در ریزساختار به دست آمده از نمونه‌های TCP-۷ و TCP-۹ تفاوت زیادی نداشته‌اند. میزان تفاوت مقدار فریت فلز جوش به نسبت نمونه TCP-۲ به مقدار ۳-۴ درصد است. از این رو کاهش استحکام کششی و بیشینه نیروی برشی به دلیل رشد زیاد دانه است که باعث شده علاوه بر کاهش مقدار فریت نسبت به دیگر نمونه‌ها، خواص مکانیکی نیز کاهش یابد. به طور کلی افزایش حرارت ورودی تا میزان مشخصی باعث بهبود رفتار مکانیکی به دلیل کاهش مقدار فریت دلتای فلز جوش شده است، اما در حرارت ورودی‌های بالاتر مقدار فریت فلز جوش تغییر چندانی نداشته و رشد اندازه دانه بسیار بیشتر بوده به طوری که باعث افت خواص مکانیکی شده است.

از آنالیز آماری تاگوچی جهت بررسی تأثیر هر یک از عامل‌های جوشکاری استفاده شده است. جدول (۵) مقادیر متوسط S/N محاسبه شده را برای هر یک از سطوح عامل‌های جوشکاری آورده شده است. با توجه به اینکه نتایج حاصل از

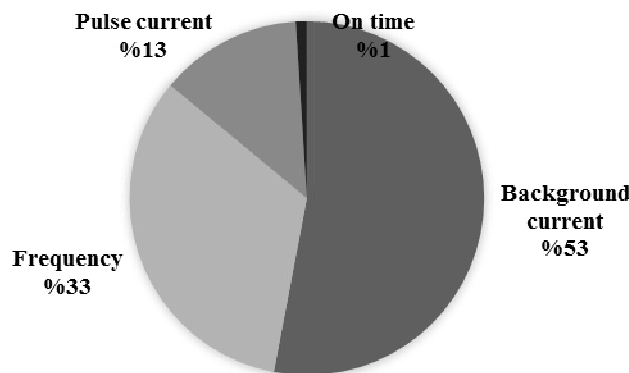
بنابراین در حرارت ورودی‌های بالا متعاقباً باید شاهد افت استحکام اتصال بود. در آزمایش ۱، نمونه کمترین حرارت ورودی را تجربه کرده است. بیشینه نیروی برشی و استحکام کششی در این آزمایش به ترتیب برابر با ۳۰۰۰ N و ۵۹۰ MPa هستند. در نمونه TCP-۲، حرارت ورودی به میزان ۳۷ درصد افزایش یافته است و استحکام کششی و بیشینه نیروی برشی به ترتیب برابر ۳۳۰۰ N و ۶۳۰ MPa هستند. این افزایش حرارت ورودی باعث افزایش استحکام شده است. دلیل افزایش استحکام را می‌توان به کاهش مقدار فریت در فلز جوش مرتبط دانست. مشاهدات ریزساختاری نشان داده است که افزایش حرارت ورودی منجر به افزایش اندازه و کاهش مقدار فریت موجود در فلز جوش شده است و بنابراین استحکام کششی ۷ درصد (۴۰ MPa) افزایش یافته است. در نمونه TCP-۳ نسبت به نمونه TCP-۲ حرارت ورودی افزایش یافته و استحکام کششی تقریباً ۳۰ MPa کاهش یافته است. کاهش اندازه دانه به نسبت نمونه TCP-۲ باعث شده تا استحکام کششی و بیشینه نیروی برشی کاهش یابد. مقدار فریت در ساختار نمونه TCP-۱ که با استفاده از نرم افزار ImageJ محاسبه شده برابر با ۲۳ درصد، برای نمونه TCP-۲ برابر با ۱۸ درصد و برای نمونه TCP-۳ برابر با ۱۵ درصد بوده است. همان‌طور که مشاهده



شکل ۴- تأثیر عامل‌های جوشکاری بر متوسط نسبت تنش برشی: الف) تأثیر جریان زمینه، ب) تأثیر جریان ضربان، ج) تأثیر درصد زمان روشن بودن ضربان، د) تأثیر بسامد.

مشاهده می‌شود که بالاترین متوسط نسبت S/N در جریان ضربان ۱۲۰ آمپر حاصل شده است. جریان ضربان ۱۲۰ آمپر مکانی است که نسبت S/N به بیشترین مقدار خود رسیده که در شرایط بهینه جریان ضربان برابر ۱۲۰ آمپر است. با توجه به شکل (۴-ج)، مشاهده می‌شود که متوسط نسبت S/N بالاتر در درصد زمان روشن بودن ضربان برابر ۷۰ درصد است که این میزان بیانگر درصد روشن بودن ضربان در حالت بهینه برای رسیدن به بالاترین استحکام برشی است. در شکل (۴-د)، بیشترین نسبت S/N در بسامد برابر با ۵ هرتز است. این مقدار بیانگر بسامد در حالت بهینه جوشکاری است. در روش تاگوچی می‌توان از آنالیز واریانس برای پی بردن به میزان تأثیر پارامترهای مختلف جوشکاری بر خواص مد نظر استفاده کرد. به تعبیر دیگر آنالیز واریانس یک روش آماری است که به‌طور

آزمون سنبه برشی، استحکام کششی را برای هر یک از نمونه‌ها ارضا کرده است، بنابراین از بهینه‌سازی عامل‌های جوشکاری برای رسیدن به خواص کششی و برشی مطلوب صرف نظر می‌شود. متوسط نسبت S/N برای هر یک از سطوح عامل‌ها محاسبه شد و نمودار نحوه تأثیر گذاری هر یک از عامل‌ها بر بیشینه نیروی برشی به دست آمده که در شکل (۴) ارائه شده‌اند. جهت بررسی تأثیر پارامترها بر نسبت S/N، نمودارهای نسبت S/N متوسط بر حسب سطوح عامل برای هر یک از عامل‌های جوشکاری رسم شده‌اند. تغییرات زیاد شیب در این نمودارها بیانگر تأثیر بیشتر عامل بر متوسط نسبت S/N است. با توجه به شکل (۴-الف)، بالاترین نسبت S/N برای جریان زمینه در سطح ۵۰ آمپر حاصل شده است و بنابراین در شرایط بهینه جریان زمینه برابر ۵۰ آمپر است. با توجه به شکل (۴-ب)،



شکل ۵- درصد تأثیر عامل‌های مختلف جوشکاری به روش PCGTAW بر روی استحکام برشی و کششی اتصال فولاد زنگ‌نزن آستیتی ۳۲۱.

قرارگیری در دمای استحاله آستیت به مراتب کمتر می‌شود و میزان فریت دلتای فلز جوش افزایش می‌یابد. وجود فریت دلتا در فلز جوش موجب افزایش چقرمگی می‌شود. کاهش ۱۷ درصدی انرژی ضربه با افزایش حرارت ورودی در نمونه ۷-TCP به نسبت نمونه ۱-TCP به دلیل کاهش ۴۴ درصدی فریت دلتا از نمونه ۱-TCP به نمونه ۷-TCP است. از دیگر عواملی که می‌تواند انرژی ضربه را کاهش دهد تشکیل فازهای ثانویه نیتريد کروم و تیتانیوم، فاز سیگما و دیگر فازهای ترد است. فاز سیگما مهم‌ترین فازی است در حین کار و در مدت زمان‌های بالا در فولادهای زنگ‌نزن آستیتی تشکیل می‌شود. این فاز ترکیب بین فلزی آهن، کروم و مولیبدن است که بسیار ترد بوده و باعث کاهش چقرمگی می‌شود. به دلیل اینکه در حین جوشکاری زمان لازم برای تشکیل این فاز در این آلیاژ وجود ندارد لذا کاهش انرژی ضربه به دلیل وجود این فاز نیست. تحقیقات نشان داده است که تشکیل فاز سیگما در ناحیه متأثر از حرارت اتصال‌های ایجاد شده در فولادهای زنگ‌نزن بسیار رایج بوده و در طول استفاده و به‌کارگیری موجب کاهش چقرمگی و ترد شدن ساختار شده است [۵-۱۱]. ترد شدن ساختار و کاهش چقرمگی باعث افزایش محل‌های مستعد جوانه زنی ترک و رشد آن می‌شود. بنابراین، نمی‌توان از تأثیر افزایش حرارت ورودی بر احتمال تشکیل فاز سیگما در ناحیه متأثر از حرارت و فلز جوش صرفه نظر کرد.

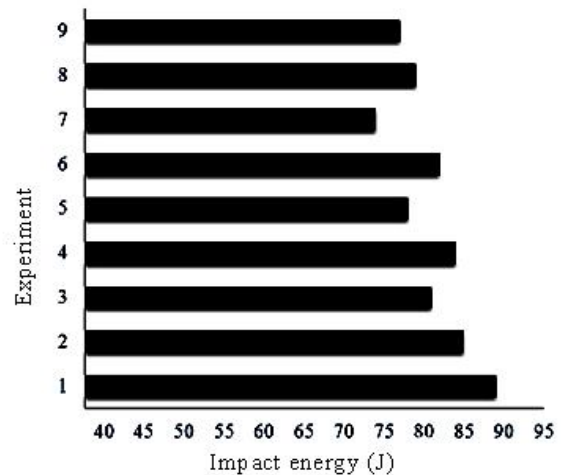
کمی بیان می‌کند که در بین عامل‌های متغیر کدام یک بیشترین تأثیر را روی خواص دارد. تحلیل نسبت S/N نشان داد کدام عامل و در چه سطحی بیشترین اثر را بر متوسط نسبت S/N دارد. نتایج آنالیز واریانس در شکل (۵) نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است جریان زمینه با ۵۲ درصد مؤثرترین عامل روی متوسط نسبت S/N را در جوشکاری فولاد زنگ‌نزن آستیتی ۳۲۱ به روش PCGTAW است. بعد از آن بسامد با تقریباً ۳۳ درصد بیشترین اثرگذاری را دارد. بسامد با ۱ درصد و جریان ضربه با ۱۳ درصد به‌عنوان عوامل با کمترین درصد تأثیرگذار بر روی متوسط نسبت S/N مشخص شده‌اند.

۳-۳- آزمون ضربه

مقایسه نتایج حاصل از آزمون ضربه در دمای محیط برای نمونه‌های آزمایش شده در شکل (۶) نشان داده شده است. در مورد فلزات جوش بیشترین انرژی ضربه مربوط به نمونه ۱-TCP با تقریباً ۹۰ ژول و کمترین مقدار انرژی ضربه مربوط به نمونه ۷-TCP با ۷۵ ژول بوده است. حرارت ورودی در نمونه ۱-TCP در کمترین میزان و در نمونه ۷-TCP بیشترین میزان را داشته است. در حرارت‌های ورودی کم، سرعت سرد شدن فلز جوش بالا است. در ساختار انجمادی فولادهای زنگ‌نزن، ابتدا فریت دلتا از مذاب تشکیل می‌شود و در ادامه به آستیت استحاله می‌یابد. بنابراین، با سرعت سرد شدن بالا

فعال تغییر کرده است. بنابراین می‌توان دریافت که تغییر در عامل‌های جوشکاری باعث تغییر در چگالی جریان تشکیل لایه غیر فعال شده است.

تغییرات در رفتار خوردگی به میزان و پراکندگی کروم بستگی دارد. میزان حلالیت کروم در فاز فریت دلتا به مراتب پتانسیل ۱۲۰۰ میلی‌ولت ادامه یافت و در ادامه جهت روبش تغییر کرد و افزایش یابد، مقاومت به خوردگی بهبود پیدا می‌کند. از دیگر عواملی که بر مقاومت خوردگی تأثیر گذار است، وجود ناخالصی MnS است که باعث کاهش مقاومت به خوردگی می‌شود. انحلال گوگرد در فریت دلتا بیشتر از آستنیت است. بنابراین انحلال ناخالصی MnS بر تقویت رفتار خوردگی مؤثر است. همچنین اختلاف پتانسیل خوردگی بین فریت دلتا و آستنیت نیز می‌تواند زیان‌آور باشد، اما این عامل نسبت به دیگر عوامل تأثیرگذار از اهمیت کمتری برخوردار است. بالا بودن انرژی مرزها و وجود ناخالصی‌ها در این محل‌ها موجب شده است که مرزهای دانه مستعد خوردگی باشند. در نمونه TCP-۱ حرارت ورودی در کمترین سطح قرار دارد و در نتیجه سرعت سرد شدن بیشتری دارد. به دلیل بالا بودن سرعت سرد شدن مقدار فریت دلتای بیشتری در ساختار آن باقی می‌ماند. این فریت به صورت اسکلتی و در مرزهای دانه آستنیت گسترده شده است. بنابراین در نمونه TCP-۱ مقاومت به خوردگی بهتری مشاهده شد. افزایش حرارت ورودی در نمونه TCP-۲ به مقدار ۳۳ درصد باعث کاهش سرعت سرد شدن و مقدار فریت دلتا در ساختار شده که موجب کاهش مقاومت به خوردگی شده است. در نمونه TCP-۷ که آلیاژ بیشترین مقدار حرارت ورودی را تجربه کرده است، مقاومت به خوردگی به نسبت نمونه TCP-۲ که حرارت ورودی کمتری داشته، بهبود یافته است. افزایش حرارت ورودی باعث کاهش سرعت سرد شدن می‌شود. در سرعت سرد شدن‌های پایین مقدار فریت دلتا کاهش پیدا می‌کند که انتظار می‌رود مقاومت به خوردگی کاهش پیدا کند. همچنین در سرعت سرد شدن‌های پایین دانه‌ها رشد می‌کنند و به مراتب از مرزهای دانه کاسته می‌شود. کاهش مرز



شکل ۶- نمودار انرژی ضربه هر یک از نمونه‌های جوشکاری شده به روش PCGTAW.

۳-۴- آزمون خوردگی

به منظور بهینه‌سازی عامل‌های جوشکاری و ارزیابی رفتار خوردگی نمونه‌های جوشکاری شده از آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک چرخه‌ای تحت تماس با محلول یک مولار سولفوریک اسید در دمای محیط استفاده شد. اغلب، کاربرد فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۲۱ در صنایع به صورت لوله است، بنابراین با توجه به اینکه سیال عبوری از لوله در تماس با گذر ریشه جوشکاری شده است، آزمون‌های خوردگی از سطح زیرین انجام شد. همچنین به دلیل اینکه شرایط آزمون به شرایط حقیقی نزدیک باشد نمونه‌ها دارای سطحی دربرگیرنده فلز جوش، ناحیه متأثر از حرارت و فلز پایه بود. با توجه به منحنی‌های خوردگی به دست آمده، در تمامی نمونه‌ها رفتار غیر فعال شدن (رویین شدن) مشاهده شد. تشکیل لایه رویین یکی از اصلی‌ترین خواص فولادهای زنگ‌نزن است. پتانسیل شروع رفتار غیر فعال شدن در تمامی نمونه‌ها مشابه بوده است. همچنین لایه رویین نمونه‌ها در محدوده پتانسیل مشخصی شکسته شده، از این رو تغییرات عوامل جوشکاری بر پتانسیل خوردگی، پتانسیل غیر فعال شدن و شکسته شدن لایه رویین تأثیری نداشته است. با توجه به منحنی‌های پلاریزاسیون حاصل از آزمون خوردگی نمونه‌ها، چگالی جریان تشکیل لایه غیر

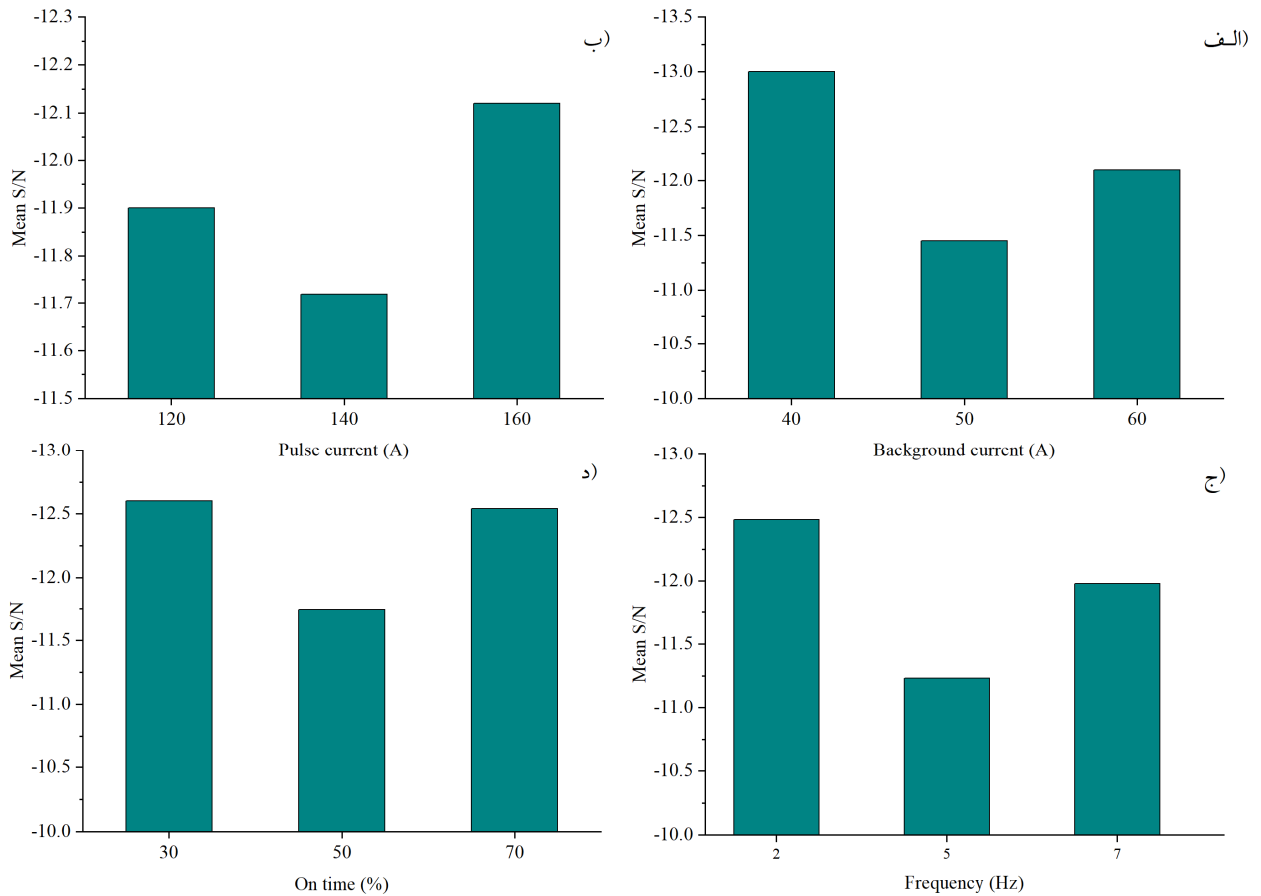
جدول ۶- مقادیر نسبت S/N برای هر یک از آزمایش‌ها.

متوسط S/N	log i (A/cm ²)	جریان زمین (A)	جریان ضربان (A)	فرکانس (Hz)	درصد زمان	کد نمونه	آزمایش	متوسط S/N
-۱۳/۹۸	-۵	-۵	۶۰	۱۱۰	۲	۳۰	TCP-۱	۱
-۹/۵۴	-۳	-۳	۷۵	۱۱۰	۵	۵۰	TCP-۲	۲
-۱۲/۰۴	-۴	-۴	۹۰	۱۱۰	۷	۷۰	TCP-۳	۳
-۱۱/۶۰	-۳/۸	-۳/۸	۶۰	۱۳۵	۷	۵۰	TCP-۴	۴
-۱۲/۰۴	-۴	-۴	۷۵	۱۳۵	۲	۷۰	TCP-۵	۵
-۱۱/۶۰	-۳/۸	-۳/۸	۹۰	۱۳۵	۵	۳۰	TCP-۶	۶
-۱۲/۶۷	-۴/۳	-۴/۳	۶۰	۱۶۰	۵	۷۰	TCP-۷	۷
-۱۲/۰۴	-۴	-۴	۷۵	۱۶۰	۷	۳۰	TCP-۸	۸
-۱۱/۱۳	-۳/۶	-۳/۶	۹۰	۱۶۰	۲	۵۰	TCP-۹	۹

می‌دهد که با وجود بالا بودن نسبت سطح کاتد به آنند، مقاومت به خوردگی بهتر بوده است. همان‌طور که ذکر شده بود به دلیل کم بودن حرارت ورودی، ساختار دارای فریت دلتای بیشتری بوده و بنابراین مقاومت به خوردگی بالاتری مشاهده شده است.

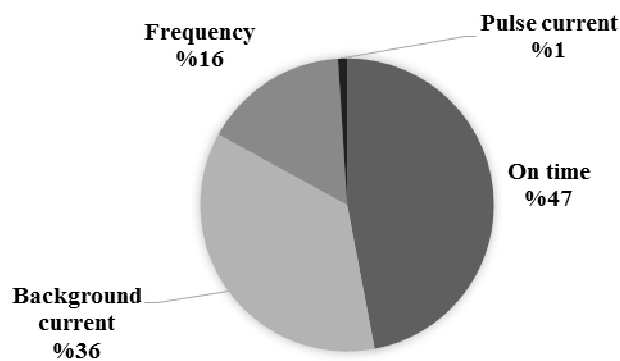
آنالیزهای آماری تاگوچی برای چگالی جریان خوردگی انجام و متوسط S/N برای هر یک از عامل‌ها محاسبه شد. در جدول (۶) متوسط S/N محاسبه شده برای هر یک از عامل‌ها بیان شده است. همان‌طور که در شکل (۷-الف)، مشاهده می‌شود بیشترین مقدار متوسط S/N برای جریان زمینه در سطح ۵۰ آمپر است. یعنی در نمونه بهینه مقدار جریان زمینه برابر ۵۰ آمپر است. با توجه به شکل (۷-ب)، بیشترین مقدار متوسط S/N برای عامل جریان ضربان در ۱۴۰ آمپر محاسبه شده است که نماینده جریان ضربان در نمونه بهینه است. در شکل (۷-ج)، تغییر شیب در بسامد ۵ هرتز بیانگر این است که در این سطح از عامل بسامد بیشترین متوسط S/N حاصل شده است. بنابراین در نمونه بهینه مقدار بسامد برابر ۵ هرتز است. از شکل (۷-د) می‌توان دریافت که بیشترین مقدار متوسط S/N هنگامی که درصد روشن بودن ضربان به مقدار ۵۰ برسد حاصل می‌شود. بنابراین درصد زمان روشن بودن ضربان در نمونه بهینه برابر با ۵۰ است. با استفاده از آنالیز واریانس روش تاگوچی،

دانه باعث بهبود رفتار خوردگی می‌شود زیرا مرزهای دانه محل مستعد به خوردگی هستند. مقایسه مقاومت به خوردگی نمونه TCP-۷ و TCP-۲ بیانگر این موضوع است. مقدار فریت دلتا از نمونه TCP-۲ به نمونه TCP-۷ کاهش پیدا کرده و در نمونه TCP-۷ ساختار درشت‌تر شده است. همان‌طور که بیان شد در هنگام انجام آزمایش به دلیل نزدیک شدن به شرایط حقیقی نمونه‌های آزمایش شده دارای سطح فلز جوش و فلز پایه بوده است. با افزایش حرارت ورودی سطح فلز جوش افزایش می‌یابد. بنابراین در نرخ خوردگی تأثیر گذار است. در هنگام حضور همزمان فلز جوش و فلز پایه، فلز جوش به دلیل تفاوت ترکیب شیمیایی، بالا بودن انرژی عمدتاً به‌عنوان ناحیه مرجح به خوردگی است و خوردگی از نوع گالوانیکی رخ می‌دهد. در این نوع خوردگی، فلز جوش به‌عنوان آند و فلز پایه به‌عنوان کاتد عمل خواهد کرد. تأثیر میزان سطح به این گونه است که اگر نسبت سطح کاتد به آند زیاد باشد، نرخ خوردگی به مراتب بیشتر خواهد بود. اما باید این نکته را در نظر گرفت که تنها عامل افزایش یا کاهش نرخ خوردگی، سطوح درگیرشونده نیست. عواملی چون مقدار کروم و مرزدانه نیز اهمیت بالایی در نرخ خوردگی دارند. در نمونه TCP-۱، حرارت ورودی و مقدار سطح فلز جوش کم‌تر بود اما مقاومت به خوردگی در بالاترین میزان به نسبت دیگر آزمایش‌ها بود. این موضوع نشان



شکل ۷- تأثیر هر یک از عامل‌های جوشکاری بر متوسط S/N چگالی جریان رویین شدن:

الف) تأثیر جریان زمینه، ب) تأثیر جریان ضربان، ج) تأثیر بسامد، د) تأثیر درصد زمان روشن بودن ضربان.



شکل ۸- درصد تأثیر هر یک از عامل‌های جوشکاری بر نسبت S/N.

با ۳۶ درصد بعد از درصد زمان روشن بودن دارای بیشترین سهم تأثیرگذاری بر نسبت S/N چگالی جریان رویین شدن دارد. بسامد و جریان ضربان تأثیر کمتری به نسبت دیگر عامل‌ها دارند.

درصد تأثیرگذاری هر یک از عامل‌های جوشکاری بر متوسط نسبت S/N محاسبه شد. مطابق با شکل (۸) درصد زمان روشن بودن ضربان با ۴۷ درصد بیشترین تأثیر را بر نسبت S/N دارد. جریان زمینه

جدول ۷- آزمایش بهینه خوردگی حاصل از بررسی آماری تاگوچی.

آزمایش	جریان ضربان (A)	جریان زمینه (A)	بسامد	درصد زمان
بهینه	۱۴۰	۵۰	۵	۵۰

۳-۵- آزمایش تأیید

به دست آورد:

$$\log i = \frac{1}{10 \left(\frac{S}{N} \right)_{pre} - 10} \quad (8)$$

همان‌طور که بیان شد از آنالیز آماری تاگوچی برای رسیدن به عامل‌های بهینه جوشکاری تحت فرایند PCGTAW استفاده شد. پس از انجام آزمون‌های خوردگی، هدف بهینه کردن چگالی جریان رویین شدن بود. با توجه به اینکه هر چه چگالی جریان رویین شدن کمتر باشد خواص خوردگی مطلوب‌تری حاصل می‌شود از این رو از مشخصه هر چه کمتر بهتر برای رسیدن به عامل‌های بهینه استفاده شد. جهت انجام محاسبات از نرم‌افزار Excel استفاده شد. بنابراین محاسبات به صورت گام به گام بیان نشده و صرفاً نتایج نهایی ذکر شده است. در جدول (۶) مقادیر S/N برای هر یک از آزمایش‌ها آورده شد. برای رسیدن به عامل بهینه بیشترین مقدار نسبت S/N برای هر کدام از عامل‌ها در نظر گرفته شد. آزمایش بهینه به صورت عامل‌های جدول (۷) طراحی و بیان شد. آنالیز تاگوچی این امکان را برای تخمین نتیجه حاصل از آزمایش بهینه فراهم می‌کند. با استفاده از روابط (۷) و (۸) مقدار چگالی جریان رویین شدن پیش‌بینی شد.

همان‌طور که ذکر شد لگاریتم چگالی جریان رویین شدن تقریباً برابر با ۴/۵- به دست آمده است رفتار سیکلی ساعت گرد مشاهده شده نمایانگر تمایل اندک به خوردگی حفره ای و ترمیم حفرات در صورت بروز است. بررسی‌های ریزساختار از نمونه آزمایش تأیید انجام شد. شکل (۱۰) ریزساختار فلز جوش فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۲۱ جوشکاری شده با عامل‌های بهینه را نشان می‌دهد. با توجه به ریزساختار مشاهده شده نوع انجماد FA بوده است و مرکز فلز جوش دارای ساختار فریت اسکلتی در زمینه آستنیت است. با استفاده از نرم افزار ImageJ درصد تقریبی فاز فریت دلتا ۱۸ درصد به دست آمد. همچنین فاصله بین اسکلت‌های فریت دلتا تقریباً برابر ۱۶-۱۴ میکرون اندازه‌گیری شد و پهنای ناحیه متأثر از حرارت به‌طور متوسط در محدوده ۱۳۰۰-۱۴۰۰ میکرون به دست آمد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با حرکت از سمت فلز پایه به مرکز فلز جوش فاصله بین دندریت‌ها کاهش یافته که این می‌تواند ناشی از

همان‌طور که بیان شد از آنالیز آماری تاگوچی برای رسیدن به عامل‌های بهینه جوشکاری تحت فرایند PCGTAW استفاده شد. پس از انجام آزمون‌های خوردگی، هدف بهینه کردن چگالی جریان رویین شدن بود. با توجه به اینکه هر چه چگالی جریان رویین شدن کمتر باشد خواص خوردگی مطلوب‌تری حاصل می‌شود از این رو از مشخصه هر چه کمتر بهتر برای رسیدن به عامل‌های بهینه استفاده شد. جهت انجام محاسبات از نرم‌افزار Excel استفاده شد. بنابراین محاسبات به صورت گام به گام بیان نشده و صرفاً نتایج نهایی ذکر شده است. در جدول (۶) مقادیر S/N برای هر یک از آزمایش‌ها آورده شد. برای رسیدن به عامل بهینه بیشترین مقدار نسبت S/N برای هر کدام از عامل‌ها در نظر گرفته شد. آزمایش بهینه به صورت عامل‌های جدول (۷) طراحی و بیان شد. آنالیز تاگوچی این امکان را برای تخمین نتیجه حاصل از آزمایش بهینه فراهم می‌کند. با استفاده از روابط (۷) و (۸) مقدار چگالی جریان رویین شدن پیش‌بینی شد.

$$\left(\frac{S}{N} \right)_{pre} = \left(\frac{S}{N} \right)_m + \sum_{i=1}^p \left(\left(\frac{S}{N} \right)_i - \left(\frac{S}{N} \right)_m \right) \quad (9)$$

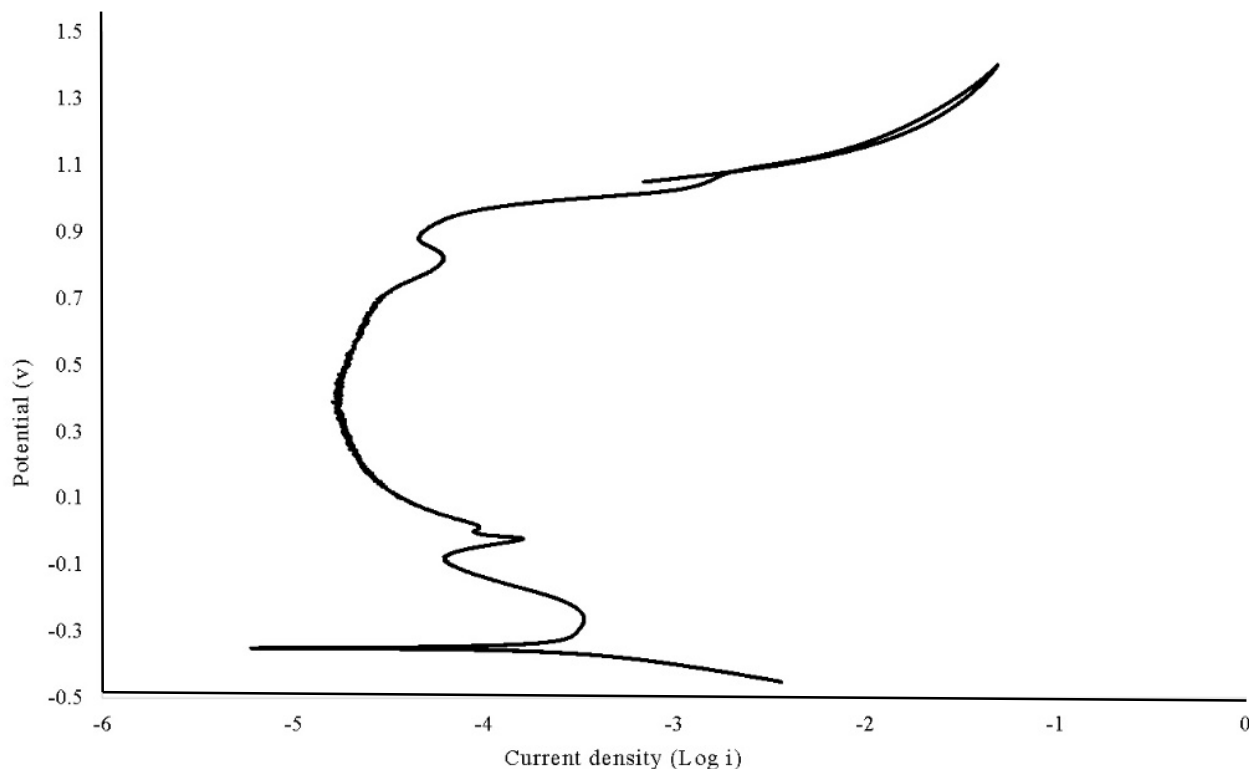
میانگین نسبت‌های S/N محاسبه شده در تمام آزمایش‌ها

$$\left(\frac{S}{N} \right)_i : \text{نسبت S/N پیش بینی شده در شرایط بهینه}$$

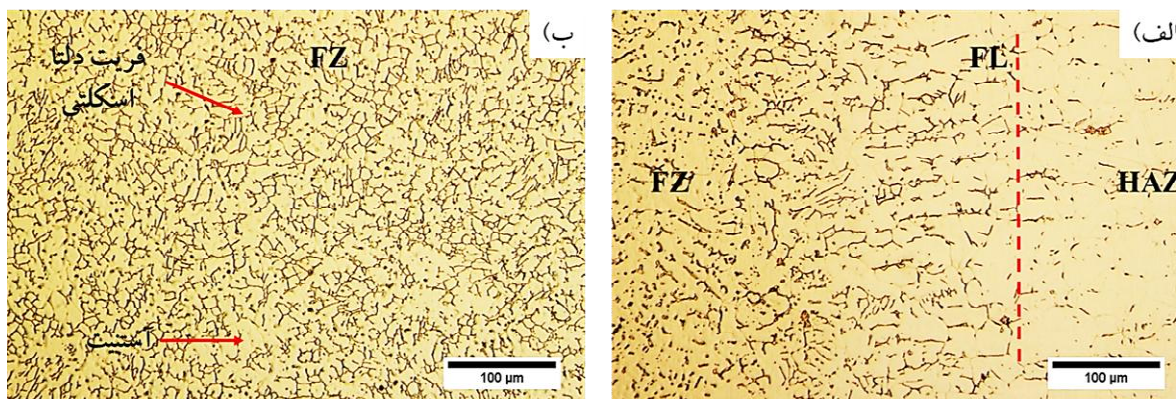
$$\left(\frac{S}{N} \right)_{pre} : \text{مقدار نسبت S/N در آزمایش تأیید}$$

P: تعداد عامل‌های مؤثر بر آزمایش

با توجه به رابطه فوق و پس از به دست آوردن نسبت $\left(\frac{S}{N} \right)_{pre}$ با استفاده از رابطه زیر می‌توان چگالی جریان رویین شدن را



شکل ۹- منحنی پلاریزاسیون پتانسیودینامیک چرخه‌ای اتصال فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۲۱ جوشکاری شده تحت عامل‌های بهینه.

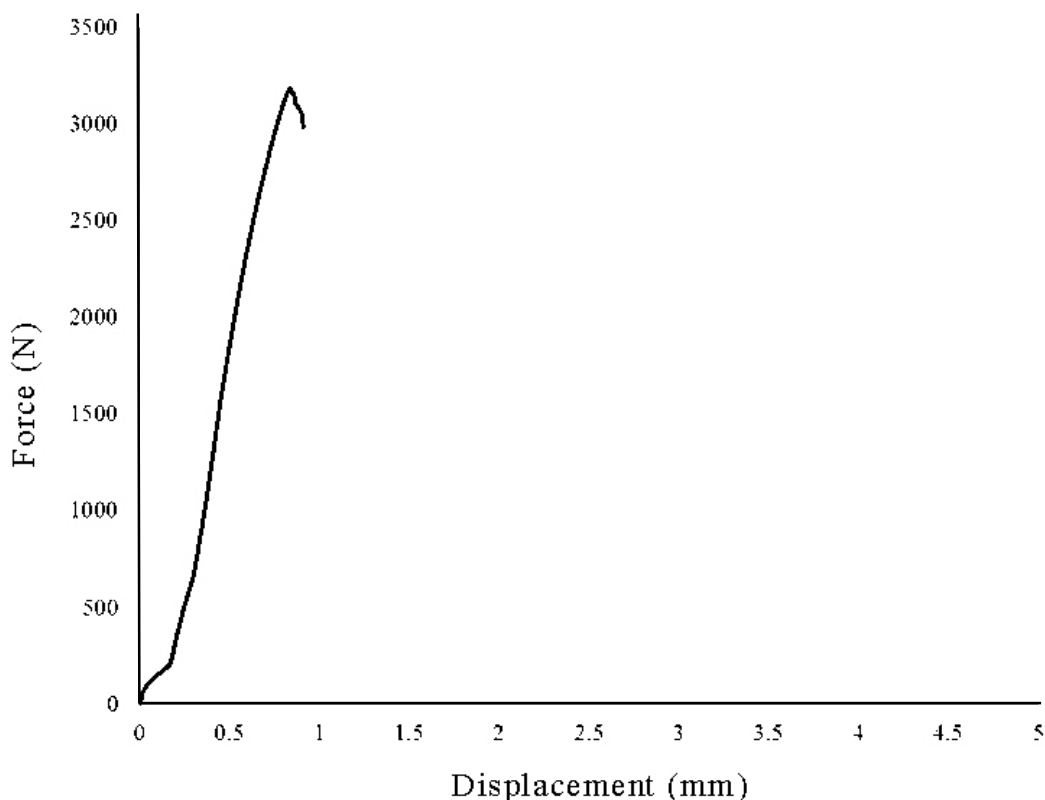


شکل ۱۰- ریزساختار سطح مقطع اتصال فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۲۱ جوشکاری شده تحت عامل‌های بهینه:

الف) ریزساختار در مرز فلز جوش و فلز پایه، ب) ریزساختار مرکز فلز جوش.

شکل (۱۱) منحنی حاصل از آزمون سنبه برشی نمونه جوشکاری شده تحت عوامل بهینه را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۱۱) بیشینه نیروی برشی تقریباً برابر با ۳۲۰۰ N به دست آمده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، بیشینه نیروی برشی به دست آمده در شرایط حقیقی کمتر از آن چیزی که پیش‌بینی

افزایش حرارت ورودی در این منطقه و کاهش تأثیر اعمال جریان ضربانی به مذاب با دمای بالاتر باشد [۱۷-۱۹]. از آنالیز آماری تاگوچی برای پیش‌بینی رفتار مکانیکی، بیشینه نیروی برشی، نیز استفاده شد. با استفاده از روابطی که بیان شد، بیشینه نیروی برشی ۳۴۰۰ N پیش‌بینی شده است.



شکل ۱۱- نمودار نیرو-جابجایی فلز جوش فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۲۱ جوشکاری شده تحت عوامل بهینه.

عامل‌های جوشکاری امکان‌پذیر است.

- بالاترین میزان فریت دلتا که توسط نرم افزار ImageJ اندازه‌گیری شد برابر با ۲۱ درصد بود که در کم‌ترین حرارت ورودی (۱۶ kJ/mm) حاصل شد. همچنین کم‌ترین میزان فریت دلتا برابر با ۱۳ درصد بود که متعلق به نمونه با حرارت ورودی ۳۱ kJ/mm بود. بنابراین افزایش حرارت ورودی موجب کاهش میزان فریت دلتای موجود در فلز جوش شد.
- تمامی نمونه‌های جوشکاری شده با استفاده از طراحی آزمایش تاگوچی دارای خواص مکانیکی قابل قبول بودند. در آزمون سنبه برشی، بیشینه نیروی برشی به‌دست آمده ۳۳۰۰ N بود که متعلق به نمونه با حرارت ورودی ۳۱ kJ/mm است. همچنین کم‌ترین مقدار نیروی برشی برابر با ۲۱ N و ۲۹۰۰ و متعلق به نمونه با حرارت ورودی ۲۸ kJ/mm بود. افزایش حرارت ورودی باعث افت خواص مکانیکی شد.

شده است است. با استفاده از روابط (۴) و (۵) استحکام کششی نمونه آزمایش تأیید برابر ۶۱۲ MPa به‌دست آمد.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی خواص اتصال فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۲۱ تحت فرایند PCGTAW پرداخته شد. به‌منظور دستیابی به عامل‌های بهینه جوشکاری برای فرایند PCGTAW، از روش‌طراحی آزمایش تاگوچی استفاده شد. پس از مشخص شدن عامل‌های بهینه فرایند PCGTAW، خواص اتصال ایجاد شده مورد بررسی قرار گرفتند. به‌منظور ایجاد اتصال از فلز پرکننده ER ۳۴۷ استفاده شد. مهم‌ترین نتایج حاصل شده در ادامه بیان شده است:

- طبق نتایج تحقیق، مهم‌ترین عامل تأثیر گذار بر خواص خوردگی و مکانیکی اتصال فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۲۱، میزان حرارت ورودی است. کنترل حرارت ورودی با کنترل

زمینه ۵۰ آمپر، بسامد ۵ هرتز و درصد زمان روشن بودن ضربان برابر ۵۰ درصد بود. در این حالت حرارت ورودی برابر 23 kJ/mm و چگالی جریان رویین شدن بر حسب لگاریتم برابر $4/5 \text{ A/cm}^2$ بود.

تشکر و قدردانی

بدینوسیله نویسندگان مراتب تشکر و قدردانی خود را از دانشگاه صنعتی اصفهان و همچنین پالایشگاه اصفهان به دلیل حمایت‌های انجام شده اعلام می‌کنند.

به‌طور کلی تمامی نمونه‌های دارای پتانسیل خوردگی $0/3 \text{ V}$ - نسبت به الکتروود مرجع Ag/AgCl داشتند ولی چگالی جریان رویین شدن متفاوتی را تجربه کردند. بیشترین چگالی جریان رویین شدن متعلق به نمونه با حرارت ورودی kJ/mm ۱۶ بود.

روش تاگوچی با تقریب نسبتاً قابل قبولی یک روش کارآمد برای بهینه‌سازی عامل‌های جوشکاری بود. با استفاده از روش تاگوچی عامل‌های بهینه برای رسیدن به خواص بهینه خوردگی به‌دست آمد. در آزمایش بهینه جریان ضربان ۱۴۰ آمپر، جریان

واژه‌نامه

1. pulsed current gas tungsten arc welding
2. constant current gas tungsten arc welding
3. pulse current
4. background current
5. aspect ratio

مراجع

1. Peckner, D., Bernstein, I. M., & Peckner, D., "Handbook of Stainless Steels", pp. 3-19, 1977.
2. Şahin, S., and Übeyli, M., "A Review On The Potential Use Of Austenitic Stainless Steels In Nuclear Fusion Reactors", *Journal of fusion energy*, Vol. 27, NO. 4, pp. 271-277, 2008.
3. Guan, K., Xu, X., Xu, H., and Wang, Z., "Effect of Aging at 700 C On Precipitation and Toughness of AISI 321 and AISI 347 Austenitic Stainless Steel Welds", *Nuclear engineering and design*, Vol. 235, NO. 23, pp. 2485-2494, 2005.
4. Schwind, M., Källqvist, J. Nilsson, J.-O., Ågren, J., and Andrén, H.-O., "Σ-Phase Precipitation In Stabilized Austenitic Stainless Steels", *Acta Materialia*, Vol. 48, NO. 10, pp. 2473-2481, 2000.
5. Wachter, O., and Brümmer, G., "Experiences With Austenitic Steels In Boiling Water Reactors", *Nuclear engineering and design*, Vol. 168, NO. 1-3, pp. 35-52, 1997.
6. Hajiannia, I., Shamanian, M., and Kasiri, M., "Microstructure And Mechanical Properties Of AISI 347 Stainless Steel/A335 Low Alloy Steel Dissimilar Joint Produced By Gas Tungsten Arc Welding", *Materials & Design*, Vol. 50, NO., pp. 566-573, 2013.
7. Wasnik, D., Dey, G., Kain, V., and Samajdar, I., "Precipitation Stages In A 316L Austenitic Stainless Steel", *Scripta Materialia*, Vol. 49, NO. 2, pp. 135-141, 2003.
8. Wegrzyn, J., and Klimpel, A., "The Effect Of Alloying Elements On Sigma Phase Formation In 18-8 Weld Metals", *Welding Journal*, Vol. 60, NO. 8, pp. 146, 1981.
9. Borst, K., and Pohl, M., "Precipitation Effects In Austenitic Stainless Weld Metals", *steel research international*, Vol. 61, NO. 6, pp. 258-261, 1990.
10. Schweinsberg, D., Sun, B., and Otieno-Alego, V., "Corrosion and Inhibition Of Aged 347 Grade Stainless Steel Boiler Tubes", *Journal of applied electrochemistry*, Vol. 24, NO. 8, pp. 803-807, 1994.
11. Tseng, C., Shen, Y., Thompson, S., Mataya, M., and Krauss, G., "Fracture and The Formation Of Sigma Phase, M_{23}C_6 , And Austenite From Delta-Ferrite In An Aisl 304L Stainless Steel", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 25, NO. 6, pp. 1147-1158, 1994.
12. Vitek, J., and David, S., "Solidification and Aging Behavior Of Types 308 and 308CRE Stainless Steel Welds" *Book Solidification and aging behavior of Types 308 and 308CRE stainless steel welds*, Series Solidification and aging behavior of Types 308 and 308CRE stainless steel welds, ed., Editor ed.^eds., Oak Ridge National Lab., TN, 1984, pp.
13. Lippold, J.C., *Welding Metallurgy And Weldability*, John Wiley & Sons, 2014.
14. Folkhard, E., and Folkhard, E., "Welding Metallurgy Of Austenitic Stainless Steels", *Welding Metallurgy of Stainless Steels*, Vol., NO., pp. 197-222, 1988.
15. Lippold, J., and Savage, W., "Solidification of Austenitic Stainless Steel Weldments: Part 2—The Effect of Alloy Composition on Ferrite

- Morphology”, *Welding Journal*, Vol. 59, NO. 2, pp. 48s-58s, 1980.
16. Giridharan, P., and Murugan, N., “Optimization of Pulsed GTA Welding Process Parameters For The Welding of AISI 304L Stainless Steel Sheets”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 40, NO. 5-6, pp. 478-489, 2009.
 17. Liu, J., Rao, Z., Liao, S., and Tsai, H., “Numerical Investigation of Weld Pool Behaviors and Ripple Formation For a Moving GTA Welding Under Pulsed Currents”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 91, NO., pp. 990-1000, 2015.
 18. Yilmaz, O., and Uglu, A.A., “Microstructure Characterization of SS308LSi Components Manufactured by GTAW-Based Additive Manufacturing: Shaped Metal Deposition Using Pulsed Current Arc”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol., NO., pp. 1-13, 2016.
 19. M., Ramkumar, Arivarasu, K.D., and Arivazhagan, N., “Comparative Studies Of High and Low Frequency Pulsing on the Aspect Ratio of Weld Bead in Gas Tungsten Arc Welded AISI 304L Plates”, *Procedia Engineering*, Vol. 97, NO., pp. 871-880, 2014.
 20. Neissi, R., Shamanian, M., and Hajihashemi, M., “The Effect of Constant and Pulsed Current Gas Tungsten Arc Welding on Joint Properties of 2205 Duplex Stainless Steel to 316L Austenitic Stainless Steel”, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 25, NO. 5, pp. 2017-2028, 2016.
 21. Karunakaran, N., “Effect Of Pulsed Current on Temperature Distribution, Weld Bead Profiles and Characteristics of GTA Welded Stainless Steel Joints”, *International Journal of Engineering and Technology*, Vol. 2, NO. 12, pp., 2012.
 22. Arivarasu, M., Ramkumar Kasinath, D., and Natarajan, A., “Effect of Continuous and Pulsed Current on The Metallurgical and Mechanical Properties of Gas Tungsten Arc Welded AISI 4340 Aeronautical and AISI 304 L Austenitic Stainless Steel Dissimilar Joints”, *Materials Research*, Vol. 18, NO. 1, pp. 59-77, 2015.
 23. Abdollahi, A., Shamanian, M., and Golozar, M.A., “Comparison of Pulsed and Continuous Current Gas Tungsten Arc Welding In Dissimilar Welding Between UNS S32750 and AISI 321 in Optimized Condition”, *Int J Adv Manuf Technol*, pp. 687-696, 2018.
 24. Sharma, S., Taiwade, R.V. and Vashishtha, H., “Effect of Continuous and Pulsed Current Gas Tungsten Arc Welding on Dissimilar Weldments Between Hastelloy C-276/AISI 321 Austenitic Stainless Steel”, *J. of Materi Eng and Perform* 26, pp 1146-1157, 2017.
 25. Ramkumar, K. D., Chandrasekhar, A., Srivastava, A., Preyas, H., Chandra, S., Dev, S., & Arivazhagan, N., “Effects of Filler Metals on The Segregation, Mechanical Properties and Hot Corrosion Behaviour of Pulsed Current Gas Tungsten Arc Welded Super-Austenitic Stainless Steel”, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 24, pp 46-61, 2016.
 26. Unnikrishnan, R., Idury, K.S., Ismail, T., Bhadauria, A., Shekhawat, S., Khatirkar, R.K., and Sapate, S.G., “Effect of Heat Input on The Microstructure, Residual Stresses and Corrosion Resistance of 304L Austenitic Stainless Steel Weldments”, *Materials characterization*, Vol. 93, NO., pp. 10-23, 2014.
 27. Chalamalasetti, S. R., “Investigation of Pitting Corrosion Rate on Micro Plasma Arc Welded Dissimilar Weld Joints of AISI 304 and AISI 430 Stainless Steel Sheets”, *Int J Advanced Design and Manufacturing Technology*, Vol. 13, pp 59-66, 2020.

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF PULSED CURRENT GAS TUNGSTEN ARC WELDING ON AUSTENITIC AISI 321 STAINLESS STEEL BONDING PROPERTIES

M. Ghalambaz¹, M. Shamanian¹, A. M. Eslami^{1*}, M. Abdollahi¹ and E. Abdolvand²

¹ Department of Materials Science and Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

² Mechanical Engineer, Isfahan Oil Refining Company, Isfahan, Iran

(Received: 10 August 2021; Accepted: 26 July 2022)

ABSTRACT

This research investigated the bonding properties of AISI 321 austenitic stainless steel from microstructural, mechanical, and corrosion points of view. To obtain the optimal parameters of pulsed current gas tungsten arc welding (PCGTAW), the Taguchi method was used. A cyclic potentiodynamic polarization test evaluated the corrosion resistance of the welded samples. The optimal conditions were achieved when the background current, the pulse current, the frequency, and the percentage of the pulse on time were 50 amps, 140 amps, 5 Hz, and 50, respectively. On the other hand, the analysis of variance showed that the percentage of pulse on time equal to 36 and the background current equal to 46 amperes were the most influential factors on the surface current density of the austenitic stainless steel 321 connection using the PCGTAW process. The mechanical properties were assessed using punch shear testing. In the optimal condition, the maximum shear force and strength were 3200 N and 612 MPa, respectively. The results showed that the most critical factor affecting the bonding properties of 321 steel was the heat input.

Keywords: AISI 321 austenitic stainless steel; PCGTAW; Taguchi method; Shear punch test; potentiodynamic polarization test.

1. INTRODUCTION

The use of new methods in joining materials and alloys has been widely developed. The pulse current welding techniques have replaced the conventional fusion welding processes. In this type, the current changes cyclically. The use of the Pulsed Current Gas Tungsten Arc Welding (PCGTAW) process leads to optimal use of electric arc energy, reduction of heat loss, reduction of heat-affected area, and reduction of residual stresses [1,2]. According to the studies, the joining of austenitic stainless steel 321 is of great importance due to its many applications in the industry, especially the oil, gas, and petrochemical industry. According to the literature, studies on the joining of this type of austenitic stainless steel have not been widely performed. Therefore, in this article, the bonding properties of steel 321 in terms of mechanical and corrosion properties are investigated. To achieve this goal, the Taguchi design method was used to

achieve the optimal factors of the PCGTAW process.

2. MATERIALS AND METHODS

Austenitic stainless steel 321 AISI with a thickness of 5 mm was used as the base metal. The filler metal for joining was ER347 type. Taguchi method was used to design experiments. Based on the Taguchi design, a 9L orthogonal array was selected as shown in Table 1. Fusion welding of the samples was done in direct current and negative polarity with CCGTAW and PCGTAW methods. Microstructural analysis (optical microscope and scanning electron microscope), mechanical testing and electrochemical testing (cyclic potentiodynamic polarization) were done to assess the properties of the welded samples.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Microstructural Analysis

Microstructural analysis showed that the structure

*: m.eslami@cc.iut.ac.ir

Table 1. Variables and their size according to the respective levels.

Symbol	Variable	Level		
		1	2	3
A	Pulse current(A)	120	140	160
B	Background current (A)	40	50	60
C	Pulse frequency(Hz)	2	5	7
D	% On time	30	50	70

of the weld metal changed from fine and fine coaxial grains to coarse columnar grains with increasing heat input. Heat input increased the temperature of the weld metal and reduced the effect of the pulsating current. The average distance between the δ -ferrite formed in the space between the dendrites with skeletal morphology was measured. This average distance was 30 μm , 23 μm , and 10 μm for the maximum, average, and minimum input heat, respectively. The increase in heat input increased the distance between the δ -ferrite skeletons. For instance, 56 and 94% increase in the heat input to the welded samples led to an increase in the distance between the δ -ferrites by 130 and 200%, respectively.

3.2. Shear strength

Table (2) shows the shear strength and the tensile strength. This tables shows that good tensile strength was achieved in all samples. According to the Hall-Patch equation, the strength of the alloy increases in the finer structure. It should be noted that in the welding process, the input heat has the most significant effect on the grain size. An increase in the input heat leads to a decrease in the cooling rate followed by the growth of the grains. Therefore, a decrease in the strength of the connection can be seen at high input temperatures. It can be seen that reducing the amount of δ -ferrite from 23% to 18%, as a result of reducing the amount of heat input, has increased tensile strength and maximum shear strength.

3.3. Impact test

As shown in Figure (1), the comparison of the results of the impact test at ambient temperature for the tested samples showed that with a high cooling rate, exposure to the austenite transformation temperature was much lower and the amount of delta ferrite of the weld metal was increased. The presence of delta ferrite in the weld metal increased the toughness. The 17% decrease in impact energy with the increase of input heat in

the TCP-7 sample compared to the TCP-1 sample is due to the 44% decrease in the delta ferrite amount. Another factor that can reduce the impact energy was the formation of chromium and titanium nitride secondary phases, sigma phase, and other brittle phases [11].

3.4. Corrosion test

According to the obtained corrosion curves, the passivation behavior was observed in all samples. The formation of the passive layer was one of the main properties of stainless steel. The potential to initiate passivation behavior was similar in all samples. Also, the passive layer of the samples was broken within a certain potential range. According to the polarization curves obtained from the corrosion test of the samples, the current density of the formation of the passive layer was changed (Table (2)). Therefore, it can be seen that the change in the welding factors caused a change in the current density of the formation of the passive layer.

4. CONCLUSION

The most important results obtained are stated below:

- According to the results of the research, the most important factor affecting the corrosion and mechanical properties of the austenitic stainless steel 321 connection was the heat input. It is possible to control the input heat by controlling the welding agents.
- Increasing the input heat decreased the amount of delta ferrite in the weld metal. An increase in the input heat caused a decrease in the mechanical properties.

Taguchi's method was an effective method for optimizing welding agents with a relatively acceptable approximation.

ACKNOWLEDGMENT

The authors hereby express their gratitude to Isfahan University of Technology and Isfahan Refinery for their support.

CONFLICT OF INTERESTS

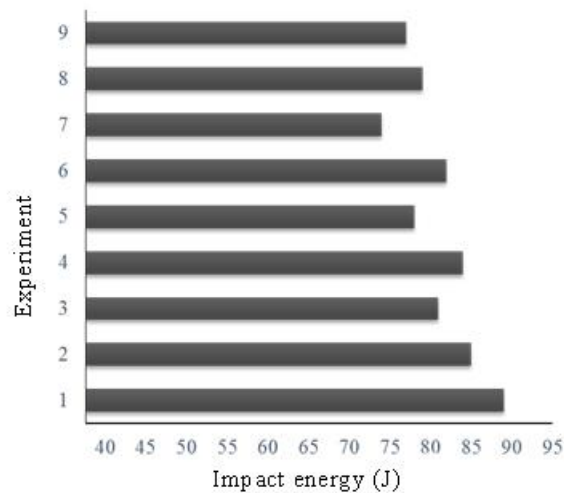
The authors have no conflict of interest to declare.

REFERENCES

1. Lippold, J.C., *Welding metallurgy and weldability*, John Wiley & Sons, 2014.

Table 2. The results of the shear punch test and the calculation of the tensile strength for each sample.

experiment	Sample code	Maximum shear force (N)	Maximum shear stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Heat Input (kJ/mm)	The percentage of change in heat input compared to experiment 1	log i (A/cm ²)
1	TCP-1	3000	317	572	16	0	-5
2	TCP-2	3300	335	630	22	38	-3
3	TCP-3	3150	350	602	26	63	-4
4	TCP-4	3080	327	588	23	44	-3.8
5	TCP-5	3138	333	600	29	81	-4
6	TCP-6	3085	328	590	21	31	-3.8
7	TCP-7	3060	325	584	31	94	-3.8
8	TCP-8	3200	340	611	21	31	-4
9	TCP-9	2900	308	554	28	75	-3.6

**Figure 1. Impact energy values of each sample welded by PCGTAW method.**

- Lippold, J., and Savage, W., "Solidification of austenitic stainless steel weldments: Part 2— The effect of alloy composition on ferrite morphology", *Welding Journal*, Vol. 59, NO. 2, pp. 48s-58s, 1980.
- Tseng, C., Shen, Y., Thompson, S., Mataya,

M., and Krauss, G., "Fracture and the formation of sigma phase, $M_{23}C_6$, and austenite from delta-ferrite in an AISI 304L stainless steel", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 25, NO. 6, pp. 1147-1158, 1994.