

## Research Paper

# The effect of AC and pulse currents on the microstructure and mechanical properties of carbon steel to austenitic stainless steel dissimilar joint

Behnam Sadeghi<sup>1</sup>, \*Hassan Sharifi<sup>2</sup>, Mahdi Rafiei<sup>3</sup>

1- MSc. Student, Young Researchers and Elite Club, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

2- Assistant professor, Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

3- Assistant professor, Advanced Materials Research Center, Department of Materials Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

**Citation:** Sadeghi B, Sharifi H, Rafiei M. The effect of AC and pulse currents on the microstructure and mechanical properties of carbon steel to austenitic stainless steel dissimilar joint. Metallurgical Engineering 2017; 20(1) 37-45 <http://dx.doi.org/10.22076/me.2017.55012.1115>

**doi:** <http://dx.doi.org/10.22076/me.2017.55012.1115>

## ABSTRACT

Dissimilar joint between austenitic stainless steel and carbon steel is used in petrochemical, oil, gas and shipbuilding applications. In this study, the effect of AC and pulsed currents on the microstructure and mechanical behavior of dissimilar joint of AISI 321 stainless steel to ASTM A57CL1 was studied. For this purpose, the GTAW process, ER 308L filler metal with diameter of 1.8 mm and argon protect gas were used. In order to study the microstructure and fracture surface of the welded samples, optical microscope and scanning electron microscope (SEM) were used. The mechanical properties of the joint, was studied by tensile, impact and hardness tests. The results showed that all samples were fractured from ASTM A537CL1 steel with a ductile manner during the tension test. In pulsed current technique the heat input of welding decreased about 11 percent as compared with AC current technique. The impact energy of weld metal for pulsed and AC currents were 200 J and 145 J, respectively. The SEM images of Charpy fracture surface of the weld metals indicated the ductile manner, but the dimples and cavities of pulsed technique were finer than AC technique.

**Keywords:** GTAW, Dissimilar Joint, Mechanical Properties, Microstructure.

■.....■

**\* Corresponding Author:**

**Hassan sharifi, PhD**

**Address:** Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

**Tel:** ( +98)9131094053

**E-mail:** sharifi@eng.sku.ac.ir

## اثر جریان متناوب و پالسی بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال غیرمشابه فولاد کربنی به فولاد زنگ‌نزن آستنیتی

بهنام صادقی<sup>۱</sup>، \*حسن شریفی<sup>۲</sup>، مهدی رفیعی<sup>۳</sup>

۱- کارشناس ارشد، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران  
 ۲- استادیار، گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران  
 ۳- استادیار، مرکز تحقیقات مواد پیشرفته، دانشکده مهندسی مواد، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

### چکیده

اتصال نامتشابه فولاد زنگ‌نزن آستنیتی به فولاد ساده کربنی در اتصالات پتروشیمی، صنایع نفت و گاز و کشتی سازی کاربرد دارد. در این پژوهش به مقایسه‌ی دو حالت جوشکاری تنگستن-گاز (GTAW) با جریان متناوب (CCGTAW) و جریان پالسی (PCGTAW) و اثرات آن بر ریزساختار و رفتار مکانیکی اتصال نامتشابه فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI 321 به فولاد کربنی ASTM A537CL1 بررسی شد. بدین منظور از فلز پرکننده‌ی ER308L با قطر ۱/۸ میلی‌متر و گاز محافظ آرگون استفاده شد. جهت بررسی ریزساختار و سطح مقطع شکست به ترتیب از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. همچنین برای بررسی خواص مکانیکی اتصال، از آزمون‌های کشش، ضربه و ریزسختی استفاده شد. نتایج نشان داد که شکست از فلز پایه A537 و از نوع نرم بوده است. حرارت ورودی در روش جوشکاری پالسی نسبت به روش متناوب حدود ۱۱ درصد کاهش یافت. انرژی ضربه در حالت پالسی حدود ۲۰۰ ژول و در روش متناوب ۱۴۵ ژول بدست. سطح مقطع شکست ناشی از آزمون ضربه در هر دو روش به صورت نرم بوده با این تفاوت که در روش پالسی دیمپل‌ها و حفرات ریزتر از روش متناوب مشاهده شد.

واژه‌های کلیدی: جوشکاری قوسی تنگستن-گاز، اتصال غیرمشابه، خواص مکانیکی، ریزساختار.

### ۱. مقدمه

برای کاهش هزینه‌های تمام شده از فولادهای کربنی و کم‌آلیاژ استفاده می‌شود [۷]. فولاد کربنی ASTM A537CL1 که یک فولاد کربنی منگنز سیلیکون‌دار با کاربرد مخازن تحت فشار است، یکی از این آلیاژها می‌باشد. این فولاد به دلیل جوش پذیری مناسب، خواص مکانیکی بالا و مقاومت کافی در برابر خوردگی در صنایع نظامی، دریایی، مخازن تحت فشار، پتروشیمی و نفت و گاز استفاده می‌شود [۸]. امروزه کاربرد اجتناب ناپذیر جوشکاری قوسی تنگستن-گاز به دلیل ایجاد جوش با کیفیت بالا، اعوجاج کم، کنترل دقیق روی میزان گرمای تولیدی و حرارت ورودی، ملاحظات اقتصادی و توانایی اتصال فلزات غیرمشابه و در نتیجه دستیابی به خواص مکانیکی مناسب‌تر، نسبت به دیگر روش‌های ذوبی گسترش یافته است [۹]. جوشکاری قوسی تنگستن-گاز با جریان متناوب AC بالانس، باعث ایجاد جریانی با قوس پایدار و حوضچه‌ی جوشی تمیز می‌شود. از این فرآیند به دلیل دارا بودن قابلیت تمرکز حرارت، به منظور کاهش اعوجاج و

فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی به دلیل شکل‌پذیری و مقاومت به خوردگی عالی و خواص مناسب در دمای بالا به طور گسترده در صنایع هسته‌ای، پتروشیمی، نفت و گاز مورد استفاده قرار می‌گیرند [۴-۱]. این فولادها به دلیل دارا بودن استحکام متوسط، به ویژه استحکام تسلیم، کاربردهای ساختاری محدودی دارند. استحکام این فولادها برابر با فولادهای نرم می‌باشد. این فولادها قابلیت سختی‌پذیری استحاله‌ای را ندارند [۵ و ۶]. اتصال فولادهای زنگ‌نزن به سایر فلزات به طور گسترده‌ای در صنایع نظامی، دریایی و مخازن تحت فشار استفاده می‌شود. عمده‌ترین کاربرد این اتصالات در جایی است که انتقالی در خاصیت مکانیکی و یا قابلیت و کارایی حین سرویس مورد نیاز باشد. بعنوان مثال، فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی A321 اغلب در نیروگاه‌ها، برای لوله‌کشی بخش‌های حاوی بخارهای داغ مورد استفاده قرار می‌گیرند، در حالیکه در پایین‌تر از حد معینی از دما و فشار،

\* نویسنده مسئول:

دکتر حسن شریفی

نشانی: شهرکرد، دانشگاه شهرکرد، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مواد.

تلفن: ۰۹۱۳۱۰۹۴۰۵۳

پست الکترونیکی: sharifi@eng.sku.ac.ir

جدول ۱. ترکیب شیمیایی فلزات پایه و فلز پرکننده براساس درصد وزنی (Wt%).

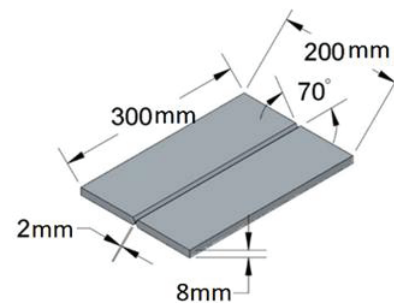
عنصر	Fe	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Mo	Ti
ASTM A537CL1	پایه	۰/۱۶	۰/۲۲	۱/۱۸	۰/۰۳	۰/۱۰	۰/۰۲	۰/۰۰۵	۰/۰۰۳
AISI A321	پایه	۰/۰۶	۰/۵۸	۱/۲۲	۱۷/۶	۸/۷	۰/۰۲	۰/۰۹	۰/۳۷۴
ER 308L	پایه	۰/۰۴	۰/۳۰	۱/۷۰	۲۲/۵	۱۰/۵	۰/۱۰	۰/۴۰	-

۳۰۴ پرداختند و اثرات کمتر جدایش را در فلز جوش و حداقل رسوبات کاربید کروم در منطقه متأثر از حرارت را در روش پالسی مشاهده کردند. در پژوهشی طهماسبی و ایوبی [۲۲] به این نتیجه رسیدند که با تغییر نوع جریان از حالت متناوب به حالت پالسی میزان حرارت ورودی کاهش و خواص مکانیکی بهبود می‌یابد. همچنین مشاهده کردند که ساختار حاصل از جوشکاری با استفاده از جریان پالسی ریزدانه‌تر از جریان متناوب بود و پهنای ناحیه متأثر از حرارت کاهش یافت. با توجه به مطالب عنوان شده مشخص شد که پژوهشی در رابطه با مقایسه جریان متناوب و پالسی و اثر آن روی خواص مکانیکی و ریزساختار اتصال غیرمتشابه فولاد زنگ‌نزن آستنیتی A321 به فولاد کربنی A537CL1 با فلز پرکننده ER308L در متون علمی چاپ شده، مشاهده نشد و با توجه به اینکه این اتصال در صنایع نفت و گاز و بویژه در مبدل‌های حرارتی و مخازن تحت فشار و اتصالات آن از اهمیت بالایی برخوردار است، در این پژوهش به بررسی اثر جریان پالسی و متناوب در روش جوشکاری قوسی تنگستن-گاز در اتصال نامتشابه فولاد زنگ‌نزن آستنیتی A321 به فولاد کربنی A537CL1 با فلز پرکننده ER308L پرداخته شد.

## ۲. روش تحقیق

در این تحقیق از فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی AISI 321 و کربنی ASTM A537CL1 با ضخامت ۸ میلی‌متر و با ابعاد ۲۰۰×۱۵۰ میلی‌متر مربع به عنوان فلزات پایه و فلز پرکننده ER308L با ترکیب شیمیایی ارائه شده در جدول (۱) استفاده شد.

نمونه‌ها بر اساس استاندارد AWS D1.1 و بصورت جناغی دوطرفه با زاویه ۷۰ درجه (شکل ۱) لبه‌سازی شدند. اتصال ورق‌ها به روش GTAW و با دو جریان پالسی و متناوب با استفاده از سیم جوش ER 308L به قطر ۱/۸ میلی‌متر با گاز محافظ آرگون با خلوص ۹۹/۹۹ درصد انجام شد. در فرآیند جوشکاری با جریان پالسی، مدت زمان هر پالس ۰/۲ ثانیه در نظر گرفته شد. مقادیر شدت جریان، ولتاژ و سرعت جوشکاری در هر دو نوع جریان اندازه‌گیری شد. حرارت ورودی جوشکاری توسط رابطه (۱) و بر حسب kJ/mm محاسبه شد. در این رابطه ولتاژ بر حسب ولت، I جریان بر حسب آمپر، S سرعت حرکت نازل دستگاه بر حسب میلی‌متر بر ثانیه و n راندمان حرارتی است که برابر ۰/۶ در نظر گرفته



شکل ۱. طرح اتصال ورق‌ها برای انجام فرآیند جوشکاری.

افزایش خواص مکانیکی و متالورژیکی استفاده می‌شود [۱۰]. جوشکاری تنگستن-گاز با جریان پالسی علاوه بر مزیت‌های ذکر شده برای جریان متناوب، باعث ریزدانه شدن ساختار فلز جوش و کاهش پهنای منطقه متأثر از حرارت می‌شود [۱۱]. طبق نظر نیدهام [۱۲] در روش جوشکاری قوسی با جریان پالسی، جریان جوشکاری به سرعت از یک مقدار بالایی<sup>۲</sup> به مقدار پایینی<sup>۳</sup> تغییر می‌کند که باعث تشکیل لایه‌هایی بصورت نقطه جوش‌های روی هم افتاده می‌شود. در طول مدت زمان جریان بالایی ذوب و در طول مدت زمان جریان زمینه انجماد رخ می‌دهد. جریان بالایی باعث کنترل رسوب مناسب و کنترل اندازه دانه می‌شود. امروزه کاربرد اجتناب ناپذیر فرآیند جوشکاری قوسی تنگستن-گاز به دلیل ملاحظات اقتصادی، دستیابی به خواص مکانیکی مناسب‌تر، سرعت بالای جوشکاری و کیفیت بهتر جوش نسبت به دیگر فرآیندهای ذوبی گسترش یافته است. در این راستا تحقیقات متعددی روی مقایسه‌ی جریان پالسی و متناوب و تاثیر آن بر خواص فیزیکی و مکانیکی صورت گرفته است [۱۹-۱۳]. در پژوهشی رامکومار و همکارانش [۲۰] به بررسی اثر جریان پالسی و متناوب روی خواص مکانیکی و ریزساختاری اتصال نامتشابه اینکونل ۷۱۸ و فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ پرداختند و نتیجه گرفتند که خواص مکانیکی و متالورژیکی در روش جوشکاری پالسی بهتر از روش جوشکاری با جریان متناوب است. رامکومار و همکارانش [۲۱] در پژوهشی دیگر به بررسی اثر جریان پالسی و متناوب روی خواص مکانیکی و ریزساختاری اتصال نامتشابه اینکونل ۶۲۵ و فولاد زنگ‌نزن

1. Needham
2. Peak Current
3. Background Current

جدول ۲. پارامترهای جوشکاری در پاس‌های مختلف در دو حالت جوشکاری.

روش جوشکاری	شماره پاس جوشکاری	جریان پالس (A)	جریان زمینه (A)	جریان معادل (A)	ولتاژ (V)	سرعت جوشکاری (mm.s-1)	حرارت ورودی (kJ/mm)	حرارت ورودی کلی (kJ/mm)
جوشکاری پالسی	۱	۲۲۰	۱۸۰	۲۰۰	۱۲	۲	۰/۷۲	۳/۱۶
	۲	۲۲۰	۱۸۰	۲۰۰	۱۲	۲	۰/۷۲	
	۳	۲۰۰	۱۶۰	۱۸۰	۱۲	۱/۵	۰/۸۶	
	۴	۲۰۰	۱۶۰	۱۸۰	۱۲	۱/۵	۰/۸۶	
جوشکاری متناوب	۱	-	-	۲۳۰	۱۲	۲	۰/۸۲	۳/۵۶
	۲	-	-	۲۳۰	۱۲	۲	۰/۸۲	
	۳	-	-	۲۰۰	۱۲	۱/۵	۰/۹۶	
	۴	-	-	۲۰۰	۱۲	۱/۵	۰/۹۶	

استحکام جوش از آزمون کشش طبق استاندارد ASTM E8-00 توسط دستگاه کشش ۳۰ تنی مدل INSTRON-4486 ساخت کشور انگلستان استفاده شد و نمونه‌های کشش بصورت عرضی تهیه شدند [۲۳]. شکل (۲) جزئیات نمونه برای آزمون کشش طبق استاندارد ASTM E8-00 را نشان می‌دهد. جهت تعیین انرژی ضربه از آزمون ضربه شاریپی، طبق استاندارد ASTM E23-00 استفاده شد [۲۴]. آزمون ضربه توسط دستگاه سنتام مدل SIT 300 در دمای محیط انجام شد. آزمون ریزسختی سنجی ویکرز بر روی نمونه‌ها در راستای افقی مطابق با استاندارد ASTM E-92 انجام شد و

شد. مشخصات پارامترهای جوشکاری در جدول (۲) ارائه شده است. در روش پالسی به دلیل اعمال جریان نوسانی، نمی‌توان یک جریان ثابت را در نظر گرفت به همین دلیل باید از رابطه‌ی جریان میانگین مطابق رابطه‌ی (۲) استفاده کرد. در جوشکاری پالسی به دلیل کمتر بودن جریان میانگین از جریان در حالت جوشکاری، حرارت ورودی به قطعه نیز کمتر بدست آمد. در رابطه‌ی (۲)  $I_{ave}$  جریان میانگین،  $I_p$  جریان حداکثر،  $I_B$  جریان حداقل،  $t_p$  زمان جریان حداکثر و  $t_B$  زمان جریان حداقل در جوشکاری پالسی است.

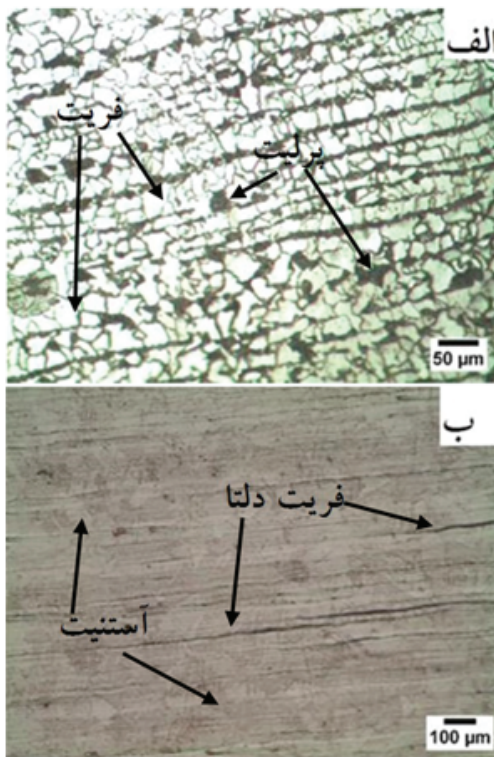
معادله ۱.

$$Q = \left( \frac{V \times I \times 60}{1000 \times S} \right) \eta$$

معادله ۲.

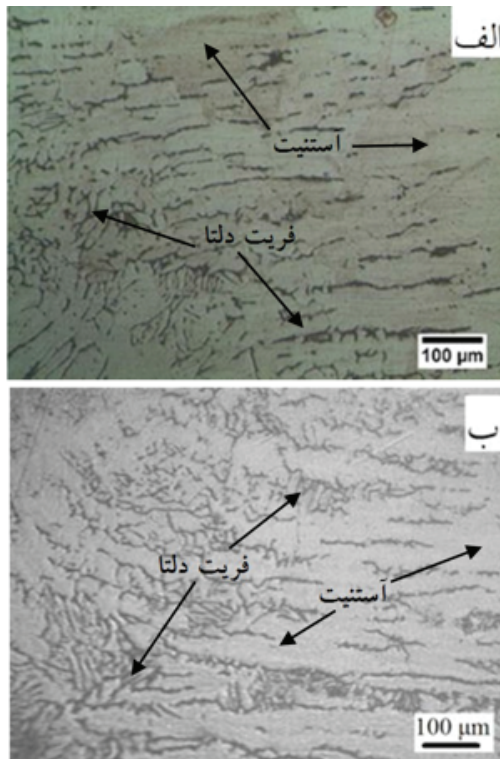
$$I_{ave} = \frac{I_p \cdot t_p + I_B \cdot t_B}{t_B + t_p}$$

بعد از عملیات جوشکاری تعدادی نمونه به ابعاد  $50 \times 10$  میلی‌متر مربع به منظور مطالعه و بررسی ریزساختار مناطق فلزات پایه، فلز جوش، منطقه متأثر از حرارت و همچنین تحولات ریزساختاری آماده‌سازی شدند. پس از برش، نمونه‌ها با سنباده‌های ۶۰ تا ۳۰۰۰ آماده‌سازی شدند و پولیش نهایی با ترکیب آب و آلومینا ( $Al_2O_3$ ) انجام شد. در نهایت نمونه‌ها در دو مرحله اچ شدند. بدین صورت که ابتدا فولاد A537CL1 توسط محلول نایتال ۳٪ (۱۰۰ میلی‌لیتر اتیل الکل ۹۶٪ + ۱۰ میلی‌لیتر اسید نیتریک) و سپس فولاد زنگ‌نزن آستنیتی A321 و فلز جوش توسط محلول ماربل (۱۰ گرم سولفات مس + ۵۰ میلی‌لیتر آب + ۵۰ میلی‌لیتر هیدروکلریک اسید) اچ شدند. جهت بررسی ریزساختار و سطح مقطع شکست در این پژوهش به ترتیب از میکروسکوپ نوری ساخت شرکت صایران از نوع IM 420 و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مجهز به سیستم آنالیز EDX مدل LE0440i استفاده شد. به منظور ارزیابی خواص مکانیکی از آزمون‌های کشش، ضربه و ریزسختی سنجی استفاده شد. جهت تعیین و مقایسه

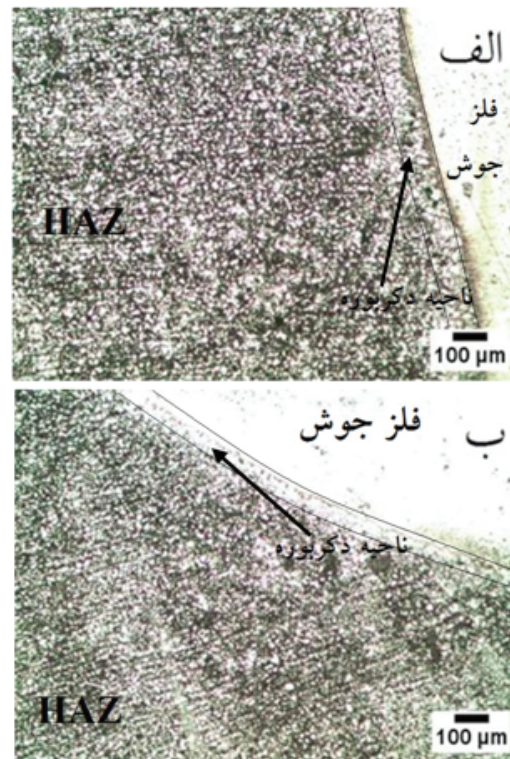


شکل ۲. ریزساختار فلزات پایه، (الف) فولاد کربنی A537CL1، (ب) فولاد زنگ‌نزن آستنیتی A321.





شکل ۴. ریزساختار منطقه متأثر از حرارت سمت فولاد زنگ‌نزن A321، (الف) جریان متناوب، (ب) جریان پالسی.



شکل ۳. ریزساختار منطقه متأثر از حرارت سمت فولاد کربنی A537، (الف) جریان متناوب، (ب) جریان پالسی.

متأثر از حرارت حاصل از روش جوشکاری با جریان متناوب است. همانطور که در این شکل مشخص است دانه‌ها نسبت به فلز پایه ریزتر شده‌اند و یک ناحیه دکربوره در مرز فلز جوش تشکیل شده است که این امر ناشی از اختلاف ترکیب شیمیایی فلز جوش و فلز پایه و حلالیت بالای کربن در فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی است که باعث نفوذ کربن از سمت فلز پایه به سمت فلز جوش می‌شود. این امر باعث کاهش پرلیت در این ناحیه می‌شود و ساختار فریتی هم محور شکل می‌گیرد [۱۰]. در شکل (۳) -ب نیز ساختار نسبت به فلز پایه ریزدانه‌تر شده است و نفوذ کربن نیز در نزدیکی فلز جوش اتفاق افتاده است. تنها تفاوت موجود در منطقه متأثر از حرارت بین دو روش جوشکاری عرض این ناحیه می‌باشد. در روش جوشکاری پالسی برای ذوب کردن فلز پایه در شدت جریان بیشینه، انرژی حرارتی در مدت زمان کمتری به فلز پایه اعمال می‌شود که این امر باعث کاهش عرض منطقه متأثر از حرارت می‌شود [۲۶].

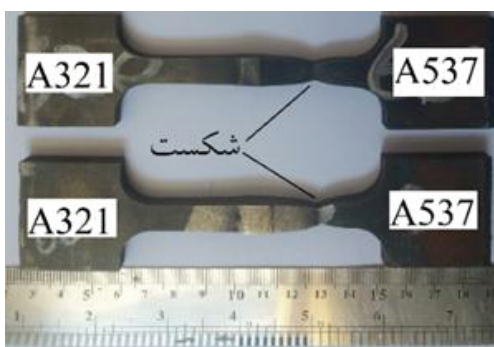
ریزساختار فصل مشترک فلز جوش و فلز پایه فولاد زنگ‌نزن آستنیتی A321 در شکل (۴) آورده شده است. در این ناحیه ساختار به صورت آستنیتی به همراه فریت دلتا می‌باشد. همانطور که مشخص است در این ناحیه فریت یک رشد هم محور را داشته است که این رشد باعث محدود شدن رشد دانه‌ها می‌شود و از ایجاد ترک ذوبی در این ناحیه

نتایج آن بصورت پروفیل سختی ترسیم شد و مورد ارزیابی قرار گرفت [۲۵]. جهت بررسی سطح مقطع شکست و نوع شکست در نمونه‌های آزمون کشش و ضربه از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد.

### ۳. نتایج و بحث

شکل (۲) تصاویر میکروسکوپ نوری نمونه‌های متالوگرافی شده از فلزات پایه AISI A321 و ASTM A537 را نشان می‌دهد. شکل (۲) -الف ساختار نوردی فلز پایه فولاد کربنی ASTM A537CL1 را نشان می‌دهد. این تصویر نشان می‌دهد که ساختار به صورت فریتی - پرلیتی می‌باشد که دانه‌های روشن فاز فریت و دانه‌های تیره فاز پرلیت را که در جهت نورد کشیده شده‌اند، نشان می‌دهد. ساختار نوردی فلز پایه فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI A321 که متشکل از زمینه آستنیت به همراه فریت دلتا است در شکل (۲) -ب آمده است. در این تصویر زمینه آستنیتی با رنگ روشن و فاز فریت دلتا به رنگ تیره قابل مشاهده است. فریت دلتا که ناشی از جدایش عناصر فریت‌زا (بوپژه کروم) در طی انجماد است، به صورت نواری در جهت نورد کشیده شده است.

منطقه متأثر از حرارت سمت فولاد کربنی A537 حاصل از اتصال به دو روش پالسی و متناوب در شکل (۳) ارائه شده است. شکل (۳) -الف نشان دهنده ریزساختار منطقه

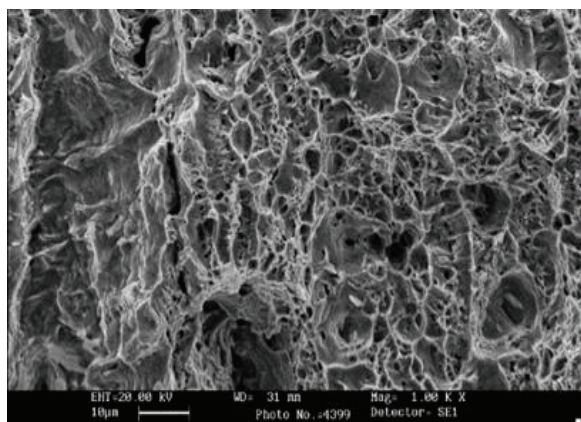


شکل ۶. محل شکست نمونه‌های جوشکاری شده از فلز پایه فولاد کربنی A537.

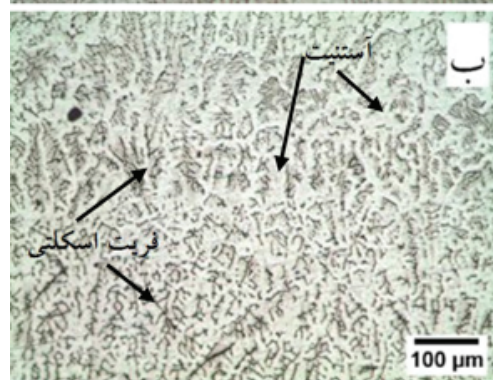
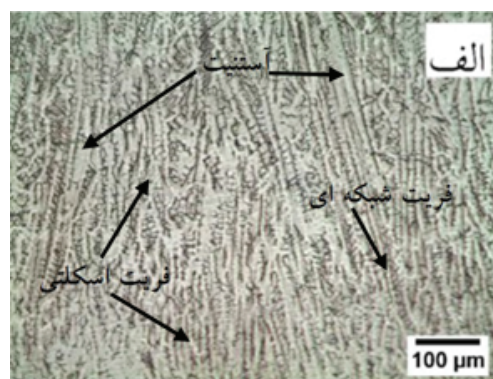
یعنی فولاد کربنی A537 دچار شکست شدند. این موضوع نشان می‌دهد که در هر دو حالت جوشکاری، استحکام در فلزات جوش و مناطق متأثر از حرارت مناسب بوده و هیچ‌گونه مشکلی در این نواحی وجود ندارد. وجود فریت در فلز جوش و افزایش فریت دلتا در منطقه متأثر از حرارت سمت فلز پایه A321، عامل افزایش استحکام این نواحی و جلوگیری از وقوع شکست در آزمون کشش می‌باشد. زیرا فریت در فلز جوش، بعنوان یک عامل استحکام دهنده‌ی ثانویه عمل می‌کند و مقدار استحکام فلز جوش و منطقه HAZ را افزایش می‌دهد و در نتیجه موجب افزایش استحکام نسبت به نمونه‌های آستنیتی می‌شود. در منطقه متأثر از حرارت سمت فولاد کربنی به دلیل همگن شدن و ریز دانه شدن دانه‌های فریت و پرلیت نسبت به فلز پایه، استحکام افزایش یافته و مانع از وقوع شکست در این ناحیه شده است.

جدول (۳) نتایج آزمون کشش برای فلزات پایه و نمونه‌های جوشکاری شده توسط هر دو روش جوشکاری را نشان می‌دهد.

شکل (۷) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مربوط به سطح شکست فلز پایه‌ی A537CL1 را نشان می‌دهد. از آنجایی که در هر دو حالت جوشکاری پالسی و متناوب



شکل ۷. شکست نگاری از سطح شکست نمونه در آزمون کشش.



شکل ۵. ریزساختار منطقه فلز جوش، (الف) جریان متناوب، (ب) جریان پالسی.

جلوگیری می‌کند. در این ناحیه فریت بصورت اپی‌تکسیال رشد می‌کند و باعث جلوگیری از تمرکز تنش در منطقه متأثر از حرارت می‌شود. همانگونه که در شکل (۴) دیده می‌شود تغییر چندانی در این ناحیه مشاهده نمی‌شود. تنها تغییر آن افزایش فریت دلتا و کاهش اندازه دانه‌های آستنیت در این ناحیه نسبت به فلز پایه است که دلیل آن حرارت متأثر از جوشکاری می‌باشد.

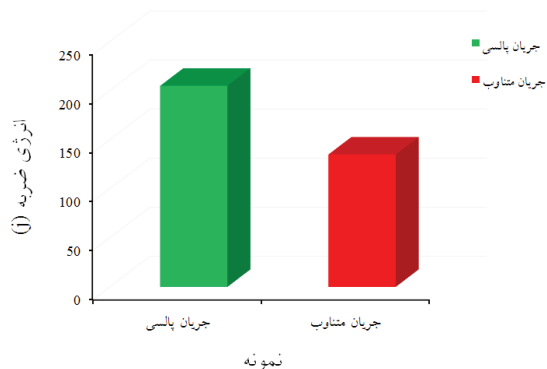
شکل (۵) الف و ب به ترتیب ریزساختار فلز جوش حاصل از روش جوشکاری متناوب و پالسی را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، ساختار در هر دو روش به صورت فریت اسکلتی با زمینه آستنیت مشاهده می‌شود. تنها تفاوت در ریزساختار فلز جوش اندازه بازوهای دندریتی می‌باشد. در روش جوشکاری با جریان پالسی به دلیل بالا بودن شدت جریان در جریان بالایی، گرمای بیشتری به نمونه وارد می‌شود. زمانیکه شدت جریان به جریان زمینه و حد پایینی خود می‌رسد باعث افزایش زمان سرد شدن قطعه می‌شود و دانه‌ها فرصت رشد پیدا می‌کنند. با کاهش حرارت ورودی رشد دانه‌ها در حین انجماد کمتر می‌شود و ساختار نهایی جوش ناشی از انجماد در منطقه فلز جوش به سمت ریزتر شدن دندریتها می‌رود [۲۶].

همانطور که در شکل (۶) نشان داده شده است، در آزمون کشش، تمامی نمونه‌ها در هر دو روش از فلز پایه ضعیف‌تر،

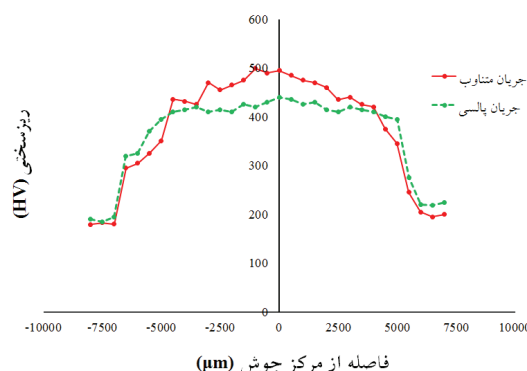


جدول ۳. خواص مکانیکی فلز جوش و فلزات پایه.

نمونه	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام کششی (MPa)	درصد ازدیاد طول (%)
نمونه جریان پالسی	۳۲۰	۵۱۰	۳۸
نمونه جریان متناوب	۳۱۰	۵۰۳	۳۷
فلز پایه ASTM A537CL1	۳۱۵	۴۹۰	۳۷
فلز پایه AISI A321	۳۰۰	۵۸۰	۴۰



شکل ۹. نتایج آزمون ضربه شارپی در دمای محیط.



شکل ۸. پروفیل ریزسختی از فلز پایه‌ی فولاد کربنی A537CL1 تا فلز پایه فولاد زنگ‌نزن آستنیتی A321.

اما در ناحیه فلز جوش اختلافی در حدود ۸۰ ویکرز بین دو روش به مشاهده می‌شود. ریزسختی در این ناحیه برای روش جریان پالسی در حدود ۴۲۰ ویکرز و برای روش متناوب در حدود ۵۰۰ ویکرز می‌باشد. دلیل این اختلاف را می‌توان به فریت درون فلز جوش نسبت داد. همانطور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود در حالت متناوب به دلیل بالاتر بودن میزان حرارت ورودی، فریت در این ساختار بیشتر رشد کرده و به هم پیوسته‌تر است که این باعث شکل‌گیری یک ساختار دوفازی قوی‌تر می‌شود که باعث افزایش میزان سختی می‌گردد. شکل (۹) نتایج آزمون ضربه فلز جوش برای هر دو حالت جوشکاری پالسی و متناوب را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۹) انرژی ضربه برای نمونه‌ی پالسی حدود ۲۰۰ ژول و برای نمونه‌ی متناوب ۱۴۵ ژول می‌باشد. در روش متناوب افزایش حرارت ورودی باعث ایجاد ساختار فریت اسکلتی پیوسته‌تر و درشت‌تر شدن دانه‌ها نسبت به روش پالسی می‌شود که این امر باعث کاهش انرژی ضربه و تردتر شدن فلز جوش در این روش می‌شود.

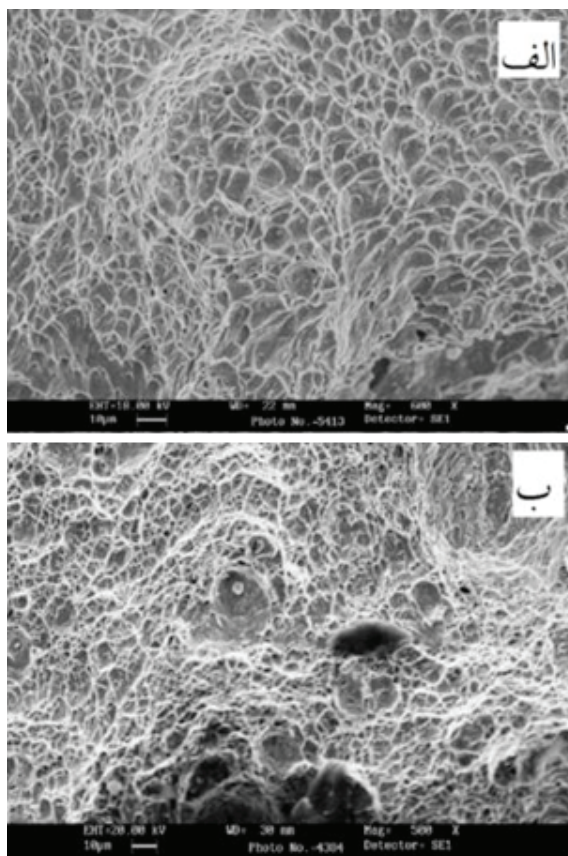
شکل (۱۰) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مربوط به سطح شکست فلز جوش ناشی از انرژی ضربه را نشان می‌دهد. شکل (۱۰) الف- مربوط به نمونه‌ی پالسی و شکل (۱۰) ب- مربوط به نمونه‌ی جوشکاری شده با جریان متناوب است. در این سطوح خطوط سیلان مشخص بوده و حالت پیوسته دارد. حفرات و دیپل‌ها نیز در ساختار مشاهده می‌شوند. حضور دیپل‌های درشت و حفرات قیفی شکل در سطح

نمونه‌ها از قسمت فلز پایه‌ی دچار شکست شدند، در نتیجه سطح مقطع شکست یکی از نمونه‌ها جهت تعیین نوع شکست مورد بررسی قرار گرفت. همانطور که مشاهده می‌شود این سطح شکست مشخصه‌های شکست نرم را نشان می‌دهد. در این سطوح خطوط سیلان مشخص بوده و حالت پیوسته دارد. حفرات و دیپل‌ها نیز در ساختار به چشم می‌خورند. حضور دیپل‌های درشت و حفرات قیفی شکل در سطح شکست، نشان می‌دهد که شکست بصورت کاملاً نرم اتفاق افتاده است. شکل (۸) نتایج آزمون ریزسختی سنجی افقی از فلز پایه‌ی فولاد زنگ‌نزن آستنیتی A321 تا فلز پایه‌ی فولاد کربنی A537 را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود در هر دو روش جوشکاری با جریان پالسی و متناوب، ریزسختی از سمت فلزات پایه به سمت فلز جوش یک روند صعودی را دارد. این شکل نشان می‌دهد که ریزسختی برای فلز پایه‌ی فولاد زنگ‌نزن آستنیتی در محدوده ۲۰۰ ویکرز و برای فلز پایه‌ی فولاد کربنی در حدود ۱۸۰ ویکرز است. در مناطق متأثر از حرارت افزایش محسوس سختی نسبت به فلزات پایه مشاهده شد که دلیل این افزایش سختی در سمت فولاد زنگ‌نزن آستنیتی افزایش فریت دلتا در این ناحیه می‌باشد. در سمت فولاد کربنی به دلیل نوردی بودن فلز پایه، پس از انجام فرآیند جوشکاری، تبلور مجدد رخ داده که باعث افزایش سختی می‌گردد. اختلاف چندانی در سختی این ناحیه در دو روش پالسی و متناوب مشاهده نمی‌شود و تقریباً سختی در هر دو طرف یکسان می‌باشد.

شکست، نشان می‌دهد که شکست در هر دو روش بصورت کاملاً نرم اتفاق افتاده است. اما سطح شکست در روش پالسی نسبت به روش متناوب دارای دیمپل‌های ریزتر می‌باشد که این موضوع ناشی از کاهش طول بازوهای دندربیتی و ظریف‌تر شدن ریزساختار است.

#### ۴. نتیجه‌گیری

۱. ساختار فلز جوش در هر دو روش شامل فریت اسکلتی با زمینه آستنیت بود که در روش پالسی بازوهای دندربیتی ریزتر از روش متناوب بودند.
۲. انرژی ضربه در روش جوشکاری پالسی بسیار بیشتر (در حدود ۳۰٪) از روش جوشکاری با جریان متناوب بود و سطح مقطع شکست آن متشکل از حفرات دیمپل‌های ریزتر نسبت به روش متناوب بود.
۳. در آزمون کشش تمامی نمونه‌ها از سمت فلز پایه‌ی فولاد کربنی A537 دچار شکست شدند و در فلز جوش و منطقه متأثر از حرارت شکستی رخ نداد که ناشی از جوش مناسب بود.
۴. تایید نشان داد که خواص مکانیکی در روش جوشکاری پالسی مناسب‌تر از روش جوشکاری با جریان متناوب است.



شکل ۱۰. شکست نگاری فلز جوش 308L در آزمون ضربه: (الف) جریان متناوب، (ب) جریان پالسی.

#### References

- [1] Zackay VF, Parker ER, Fahr D, and Busch R. The Enhancement of Ductility in High-Strength Steels. Transaction of the American society of Metals, 1967; 60: 252-9.
- [2] McGuire MF. Stainless steels for design engineers. Materials Park, Ohio: ASM International, 2008.
- [3] Taylor and Francis Group Steel heat treatment handbook, Portland, Oregon, U.S.A; 2007.
- [4] Sayiram G. Arivazhagan N. Microstructural characterization of dissimilar welds between incoloy 800H and 321 austenitic stainless steel. Materials Characterization, 2015; 102: 180-8.
- [5] Elmer JW, Allen SM, Eager TW. Microstructural development during solidification of stainless steel alloys. Metallurgical Transaction. 1988; 20: 1989-2117.
- [6] Fu JW, Yang YS, Guo JJ, Ma JC, Tong WH. Formation of a two-phase microstructure in Fe-Cr-Ni alloy during directional solidification. Journal of Crystal Growth, 2008; 311: 132-6.
- [7] ASTM, A 240/A 240M, Standard Specification for Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications.
- [8] ASTM, A 537/A 537M, Standard Specification for Pressure Vessel Plates, Heat-Treated, Carbon-Manganese-Silicon Steel.
- [9] AWS, Welding handbook, 9th Edition, 2004; 2: 104-46.
- [۱۰] شمعانیان. م، و اشرفی. ع. "متالورژی جوشکاری"، مرکز نشر دانشگاه صنعتی اصفهان، ویرایش سوم، ۱۹۳۱.
- [11] Rager DD. Welding Handbook, American Welding Society Inc, 1997, USA.
- [12] Needham JC. Pulsed Current Tungsten Arc Welding – an introduction to the process. Pulsed TIG-Welding Seminar, UK, 1998:1-6.
- [۱۳] نامجو، ع. اشرفی، ع. رنجبر، خ. "بررسی تاثیر پارامترهای فرآیند جوشکاری GTAW نوسانی بر خواص جوش فولاد مقاوم به حرارت HP" پایان نامه تخصصی کارشناسی ارشد، دانشکده مواد، دانشگاه شهید چمران اهواز، ۰۹۳۱.
- [۱۴] راستگردار، ع. شمعانیان، م. ساعتچی، ا. "تاثیر استفاده از جریان پالسی در جوشکاری قوسی تنگستن گاز (GTAW) بر رفتار خوردگی مقاطع جوش آلیاژ آلومینیوم 5083AA" پایان نامه تخصصی کارشناسی ارشد، دانشکده مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۰۹۳۱.
- [۱۵] نظریپور، و. سلطانی‌پور، ع. فردمنش، خ. "تاثیر تغییر جریان در جوشکاری تیگ پالسی بر خواص مکانیکی و متالورژیکی آلیاژ آلومینیوم ۳۸۰۵" نشریه علم مواد، سال دوم، شماره ۱، ۰۹۳۱.
- [16] Kumar TS. Balasubramanian V. Sanavullah MY. Influences of pulsed current tungsten inert gas welding parameters on the tensile properties of AA 6061 aluminium alloy. Materials and Design. 2007; 28(7): 2080-92.
- [17] Farahani M. Shamanian M. Ashrafzadeh F. A Comparative Study on Direct and Pulsed Current Gas Tungsten Arc Welding of Alloy 617. Manufacturing and Material Science. 2012; 2(1): 1-6.
- [18] Tong H. Ueyama T. Harada S. Ushio M. Quality and productivity improvement in aluminium alloy thin sheet welding using alternating current pulsed metal inert gas welding system. Science and Technology of Welding and Joining. 2001; 6(4): 203-8.



- [19] Yousefieh M, Shamanian M, Saatchi A. Optimization of the pulsed current gas tungsten arc welding (PCGTAW) parameters for corrosion resistance of super duplex stainless steel (UNSS32760) welds using the Taguchi method. *J. Alloy. Compd.* 2011; 509: 782-8.
- [20] Ramkumar KD, Patel SD, Praveen SS, Choudhury DJ, Prabharan P, Arivazhagan N, Xavior MA. Influence of filler metals and welding techniques on the structure-property relationships of Inconel 718 and AISI 316L dissimilar weldments. *Materials and Design*, 2014; 62:175-88.
- [21] Ramkumar KD, Mithilesh P, Varun DM, Ajay RGR, Arivazhagan N, Narayanan S. Characterization of microstructure and mechanical properties of Inconel 625 and AISI 304 dissimilar weldments. *ISIJ Int*, 2014; 54(4): 900-8.
- [۲۲] طهماسبی، ع و حلوایی، ا. "تأثیر نوع جریان و حرارت ورودی بر ریز ساختار و خواص مکانیکی جوشکاری قوسی گاز-تنگستن آلیاژ ریختگی بهسازی شده آلومینیوم-منیزیم-سیلیسیم". اولین همایش بین المللی و ششمین همایش مشترک انجمن مهندسی متالورژی ایران، انجمن علمی ریخته گری ایران، ۱۹۳۱.
- [23] ASTM E8-00 Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials.
- [24] ASTM E23-02 Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials.
- [25] ASTM E92-82 Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials.
- [۲۶] شایانفر، پ. شمعیان، م. "جوشکاری غیرمشابه فولاد کوننج - تمپر ASTM A517 به فولاد زنگ نزن AISI 316L و تاثیر بهینه سازی پارامترهای جوشکاری بر ریزساختار" فصلنامه علمی پژوهشی فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، سال هشتم، شماره سوم، ۳۹۳۱، ۹۸-۵۷.