

جوشکاری غیر مشابه فولاد کوئنچ-تمپر ASTM A517 به فولاد زنگ‌زن

AISI 316L و تاثیر بهینه‌سازی پارامترهای جوشکاری بر ریزساختار

پیمان شایان فر*^۱، مرتضی شمعیان^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد جوشکاری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف‌آباد، اصفهان، ایران

۲- استاد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

*payman.shayanfar@yahoo.com

(تاریخ دریافت: ۹۱/۰۱/۲۶، تاریخ پذیرش: ۹۱/۰۴/۱۸)

چکیده:

در این تحقیق به بررسی تاثیر حرارت ورودی بر ریز ساختار فلز جوش و منطقه متأثر از حرارت^۱ جوش غیر مشابه فولاد کوئنچ - تمپر ASTM A517 و فولاد زنگ‌زن AISI 316L از طریق بهینه‌سازی پارامترهای جوشکاری، پرداخته شده است. بدین منظور از دو روش جوشکاری تنگستن-گاز با جریان معمولی و جریان پالسی به همراه سیم جوش ER 309MoL به قطر ۲/۴ میلیمتر و الکتروود تنگستن با قطر ۲/۴ میلیمتر استفاده شد. جهت انجام آزمایش متالوگرافی از میکروسکوپ نوری و برای بررسی سطح شکست از میکروسکوپ الکترونی روبشی^۲ و جهت تعیین میزان انرژی ضربه از آزمایش ضربه استفاده شد. نتایج نشان داد، اندازه دانه منطقه متأثر از حرارت در روش پالسی نسبت به روش معمولی کمتر است همچنین ساختار فلز جوش کاملاً آستینیتی بوده که در روش پالسی دارای ساختار ریزتری است. علاوه بر این، نحوه رشد فلز جوش مجاور فولاد A517 نسبت به فلز جوش مجاور فولاد 316L متفاوت است. همچنین بررسی‌ها نشان داد، میزان رقت در روش پالسی کم تر شده و انرژی ضربه در هر سه منطقه فلز جوش و مناطق متأثر از حرارت در روش پالسی، افزایش یافته و شکست در فلز جوش و منطقه متأثر از حرارت فولاد 316L از نوع کاملاً نرم بوده و در منطقه متأثر از حرارت فولاد A517 از نوع نیمه ترد است.

کلمات کلیدی:

جوش غیر مشابه، فولاد کوئنچ تمپر، فولاد زنگ‌زن، ریزساختار.

۱- مقدمه

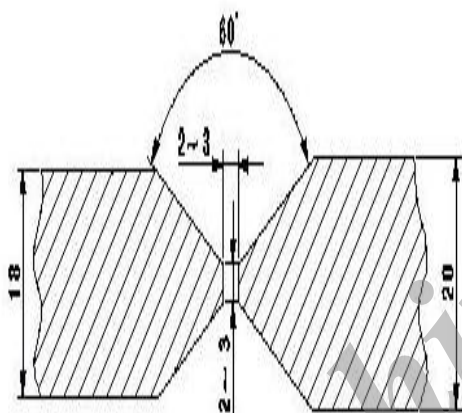
کاربرد وسیعی در ساخت تجهیزات و شناور ها دارد. با توجه به مارتنزیتی بودن این نوع فولادها و تغییر ساختار منطقه متأثر از حرارت به فریت و پرلیت، استحکام منطقه متأثر از حرارت نسبت به فلز پایه کاهش پیدا می‌کند و در نتیجه فولادهای کوئنچ-تمپر حساسیت بالایی نسبت به حرارت ورودی دارند. به همین دلیل حرارت ورودی زیاد، نرخ سرد شدن را کاهش داده و ریزساختار و خواص نا مطلوبی ایجاد می‌کند. بنابراین از فرآیندهای با حرارت ورودی زیاد نظیر الکترواسلگ^۳ و

فولاد زنگ‌زن AISI 316L یکی از پرکار بردترین فولادها در صنعت می باشد. این فولاد در صنایع غذایی، سیستم‌های لوله کشی و همچنین در ساخت شناور کاربرد فراوان دارد. مقاومت در برابر انواع خوردگی و خصوصاً مقاومت در برابر خوردگی بین دانه ای با افزایش مولیدن و کاهش کربن این فولاد، در درجه حرارت های بالا (۵۰۰-۶۰۰ درجه سانتی گراد) عملکرد خوبی از خود بجا می‌گذارد. فولاد کوئنچ-تمپر ASTM 517 A نیز یکی از مهمترین فولادها در عرصه صنعتی می‌باشد و

۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- آماده سازی و جوشکاری قطعات

در این تحقیق از فلزات پایه A517 و 316L و فلز پرکننده 309MoL با ترکیب شیمیایی ارائه شده در جدول (۱) استفاده شد. دو عدد ورق از نوع A517 به ابعاد mm (18*150*400) و دو عدد ورق 316L به ابعاد mm (20*150*400) طبق شکل (۱) بر اساس استاندارد AWS D1.1 لبه سازی^۷ شدند. عملیات لبه سازی توسط ماشین فرز و با کیفیت بالا انجام شد و پس از سمباده زنی و تمیز کاری لبه ها، قطعات به یکدیگر مونتاژ شدند.



شکل (۱): طرح اتصال ورق ها

برای جوشکاری از سیم جوش به قطر mm ۲/۴ در دو روش جوش تنگستن-گاز معمولی و پالسی استفاده شد. قبل از جوشکاری فولاد A517 در حدود ۱۰۰ درجه سانتی گراد پیش گرم شد [۳]. بعد از پیش گرم^۸، عملیات جوشکاری شروع شد و قطعات بوسیله روش معمولی و پالسی جوشکاری شدند. مشخصات پارامترهای جوشکاری و حرارت ورودی در جدول (۳ و ۲) ارائه شده است.

زیرپودری^۴ با چند سیم باید خودداری کرد و از روش‌هایی استفاده شود که کمترین میزان حرارت ورودی را داشته باشند. لذا با توجه به موارد یاد شده می‌بایست در جوشکاری این نوع فولادها از روش‌هایی استفاده کرد که حرارت ورودی کم داشته باشد تا از این طریق بتوان خسارات ناشی از تغییر ساختار در مناطق مجاور حوضچه جوش و متاثر از حرارت را به حداقل رساند. به همین دلیل ریزدانه کردن مناطق متاثر از حرارت این فولادها از اهمیت خاصی برخوردار است. در این راستا تحقیقات متعددی در مورد فولادهای کوئنچ-تمپر انجام گرفته است که برای نمونه می‌توان به تحقیقات تسنگ^۵ و ساواژ^۶ اشاره کرد که توانستند توسط جوشکاری با قوس ضربانی، دانه‌های منطقه متاثر از حرارت و فلز جوش فولاد کوئنچ-تمپر ۸۰-HY را ریز دانه کنند [۱]. همچنین ساواژ و همکاران وی موفق شدند در مورد فولاد کوئنچ-تمپر ۸۰-HY، با تغییر میزان حرارت ورودی انجامد، عرض منطقه متاثر از حرارت را کم کرده و رشد فلز جوش را از حالت صفحه‌ای به دندریتی تغییر دهند [۲]. با توجه به مطالب یاد شد و با توجه به اینکه جوش غیر مشابه این دو نوع فولاد در صنایع و بخصوص در ساخت شناور از اهمیت بالایی برخوردار است و علاوه بر این موضوع، اختلاف زیاد در ترکیب شیمیایی فولاد کوئنچ-تمپر A517 و فولاد زنگ نزن 316L، شرایط جوشکاری آنها را بسیار متفاوت کرده است. بنابر این ضروری است که در این رابطه تحقیقات کافی جهت حصول نتیجه مطلوب انجام شود. لذا در این تحقیق سعی شده است با کم کردن حرارت ورودی از طریق تغییر روش جوشکاری از معمولی به پالسی و بهینه سازی پارامترهای جوشکاری، ریز ساختار فلز جوش و منطقه متاثر از حرارت بهینه سازی شده و میزان رقت فلز جوش کاهش پیدا کند تا در نهایت خواص مطلوب ریز ساختاری حاصل گردد.

کرد. مقایسه حرارت ورودی جوشکاری معمولی و پالسی نشان داد که در جوش پالسی حرارت ورودی به میزان میانگین ۲۰ درصد کاهش پیدا کرده است و علت این امر پایین بودن جریان میانگین در جوش پالسی می باشد [۴].

$$I_{ave} = \frac{I_{pic} \times t_{pic} + I_{Base} \times t_{Base}}{t_{pic} + t_{Base}} \quad (1)$$

I_{pic} : جریان حداکثر I_{Base} : جریان حداقل

t_{pic} : زمان جریان حداکثر t_{Base} : زمان جریان حداقل

(I_{ave})، جریان میانگین نامیده می شود. جهت تعیین میزان حرارت ورودی در روش جوشکاری پالسی باید از میانگین جریان که از رابطه (۱) استخراج می گردد استفاده کرد و نمی توان به طور مستقیم از جریان حداکثر یا حداقل استفاده نمود. بعد از عملیات جوشکاری تعدادی نمونه به ابعاد 5×2.5 mm جهت انجام آزمایش متالوگرافی تهیه شد. نمونه ها به ترتیب با سمباده های شماره ۳۲۰، ۶۰۰، ۸۰۰، ۱۲۰۰، آماده سازی شد و پولیش نهایی توسط پودر آلومینا با قطر $5 \mu m$ انجام گردید. بعد از انجام عملیات پولیش، فولاد A517 توسط محلول نایتال اچ شد و بعد از عکس برداری از این منطقه مرحله دوم اچ توسط محلولی که شامل ۳ سی سی اسید کلریدریک و ۱ سی سی اسید استیک به همراه ۱ سی سی اسید نیتریک بوده انجام شد. ترتیب اچ کردن قطعات به این علت است که اگر در مرحله اول فولاد زنگ نزن اچ شود اثرات مخربی روی فولاد A517 دارد و ریز ساختار این فولاد مشخص نمی شود. تجهیزاتی که جهت بررسی ریز ساختار این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت شامل میکرو سکوپ نوری^۱ از نوع (Olympus) و میکروسکوپ

الکترونی روبشی از نوع (SEM Philips XL30) است.

آزمایش ضربه از فلز جوش^{۱۱} و مناطق متاثر از حرارت هر دو فلز پایه^{۱۲} در درجه حرارت (۵۰-) درجه سانتی گراد بر روی نمونه هایی به ابعاد $10 \times 10 \times 55$ mm و به

جدول (۱): ترکیب شیمیایی مواد مورد استفاده بر اساس درصد وزنی.

مواد مورد استفاده	A517	۳۱۶L	۳۰۹MoL
C	۰/۱۹	۰/۰۳	۰/۰۳
Si	۰/۳	۰/۴۹	۰/۶
Mn	۰/۹۱	۰/۴۷	۲/۲
P	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۳
S	۰/۰۱	۰/۰۰۷	۰/۰۳
Cr	۰/۵۷	۲۰	۲۳
Ni	۰/۰۵	۱۰/۱	۱۳/۵
V	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴
Cu	۰/۰۹	۰/۳۴	۰/۵
Mo	۰/۲۲	۱/۹۲	۲/۱
Fe	پایه	پایه	پایه

جدول (۲): مشخصات جوشکاری قوسی تنگستن-گاز معمولی

شماره پاس	۲۰۱	۴۰۳	۶۰۵	۸۰۷	۱۰۰۹
جریان معادل (A)	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰
ولتاژ (V)	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰
سرعت جوشکاری (mm/s)	۱/۰۳	۱/۰۲	۱/۰۲	۱/۰۰	۰/۹۸
حرارت ورودی (kJ/mm)	۳/۸۸	۳/۹۲	۳/۹۲	۴/۰۰	۴/۰۸

جدول (۳): مشخصات جوشکاری قوسی تنگستن-گاز پالسی

شماره پاس	۲۰۱	۴۰۳	۶۰۵	۸۰۷	۱۰۰۹
جریان معادل (A)	۱۴۵	۱۴۵	۱۴۵	۱۴۵	۱۴۵
ولتاژ (V)	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰
فرکانس (Hz)	۵	۵	۵	۵	۵
سرعت جوشکاری (mm/s)	۱/۰۲	۱	۰/۹	۰/۸۸	۰/۸
حرارت ورودی (kJ/mm)	۲/۸۴	۲/۹۰	۳/۲۲	۳/۲۹	۳/۶۲

در جوش پالسی به دلیل این که جریان به صورت نوسانی (سینوسی) اعمال می گردد، دیگر نمی توان یک جریان ثابت برای آن در نظر گرفت به همین دلیل می بایست از جریان میانگین^۹ که طبق رابطه (۱) حاصل می شود استفاده

میکروسکوپ این کار انجام می‌گردد. بدین ترتیب که این دستگاه دارای یک شاخص می‌باشد و این شاخص می‌تواند به صورت افقی حرکت کند. به همین دلیل در شروع اندازه‌گیری می‌بایست شاخص را در ابتداء بازوی دندریت قرار گیرد و آن را حرکت داده تا به انتهای بازو دندریت برسد. سپس با توجه به بزرگی نمایی میکروسکوپ، دستگاه عددی را بر حسب میکرومتر نمایش می‌دهد که این عدد، طول بازوی دندریت است. حدود ۲۰ بازو اندازه‌گیری شده و میانگین آنها به عنوان طول متوسط بیان می‌گردد.

۳- نتایج و بحث:

۳-۱- بررسی‌های ریزساختاری

۳-۱-۱- ریز ساختار منطقه متأثر از حرارت (HAZ)

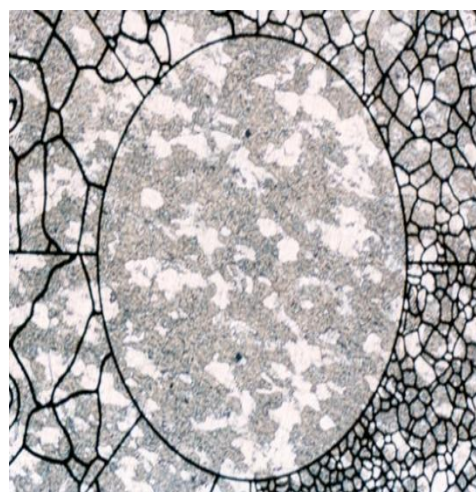
فولاد A۵۱۷

شکل ۳ (الف) ساختار فلز پایه A۵۱۷ را نشان می‌دهد که کاملاً از نوع مارتنزیتی^{۱۳} است. شکل (۳) (ب) ریز ساختار منطقه متأثر از حرارت فولاد A۵۱۷ در جوش تنگستن-گاز معمولی نشان داده شده است. در منطقه متأثر از حرارت در جوش تنگستن-گاز معمولی، ساختار مارتنزیتی فلز پایه در کنار مرز جوش به فریت و پرلیت^{۱۴} تبدیل شده است. شکل (ج) (ج)، ریزساختار منطقه متأثر از حرارت در روش پالسی را نشان می‌دهد. در این ریز ساختار نیز فاز مارتنزیت کاملاً^{۱۵} به فازهای فریت و پرلیت تبدیل شده است. با مقایسه ریز ساختار منطقه متأثر از حرارت در هر دو روش جوشکاری معمولی شکل (ب) (ب) و پالسی شکل (ج) (ج)، مشاهده می‌شود در روش جوشکاری معمولی به علت حرارت ورودی بیشتر و زمان بیشتر جهت انجام استحاله مارتنزیت، دانه‌های فریت بزرگ‌تری تشکیل شده است [۵].

تعداد ۳ نمونه برای هر قسمت و مجموعاً ۹ نمونه برای هر روش جوش انجام شد. شیار نمونه ضربه جوش عمود بر جهت جوشکاری و همچنین نمونه‌های ضربه منطقه متأثر از حرارت، در طول کناره مرز جوش تهیه شد.

۲-۲- روش اندازه‌گیری قطر متوسط دانه‌ها

روش اندازه‌گیری قطر دانه بدین گونه بود که از یک سری الگو با مش بندی مشخص بر اساس استاندارد ASTM استفاده شد. شماره اندازه دانه بر اساس استاندارد ASTM بر روی هر مش مشخص است. صفحه ای دایره ای شکل شامل چندین شماره دانه را بر روی تصویر میکروسکوپ قرار داده می‌شود. سپس با چرخاندن صفحه مش بندی و انطباق آن با دانه‌های زمینه، شماره استاندارد دانه‌های زمینه مشخص می‌گردد. حال با داشتن شماره اندازه دانه، با استفاده از جداول تبدیل اندازه دانه به قطر میانگین بر اساس استاندارد ASTM E112، قطر متوسط دانه مشخص می‌گردد. شکل ۲ نمونه ای از این مش بندی را نشان می‌دهد.

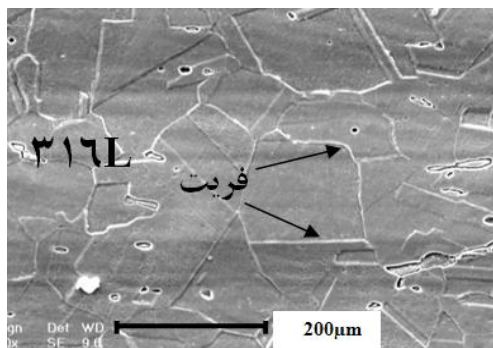


شکل (۲): نمونه ای از مش بندی استاندارد

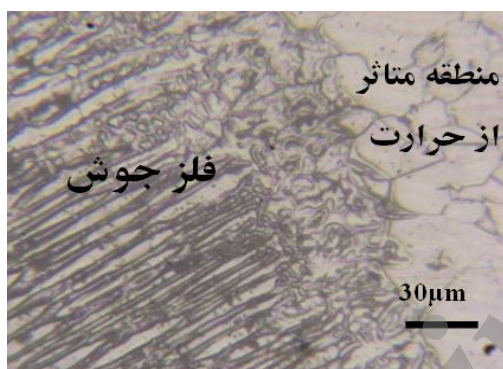
۲-۳- روش اندازه‌گیری طول بازوی دندریت

روش اندازه‌گیری بازوهای دندریتی بدین صورت است که با اتصال دستگاه اندازه‌گیری مخصوص به

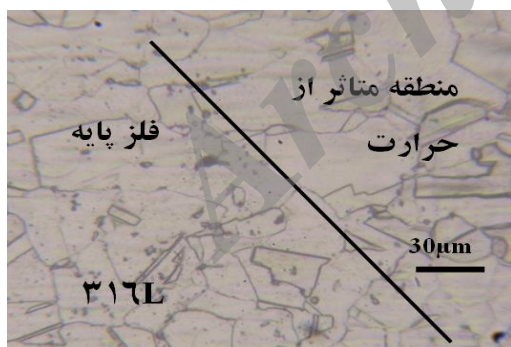
است. دانه‌های آستنیت منطقه HAZ در عرض بسیار کم در حدود $150\mu\text{m}$ از مرز جوش، به شدت افزایش پیدا کرده است.



(الف)



(ب)



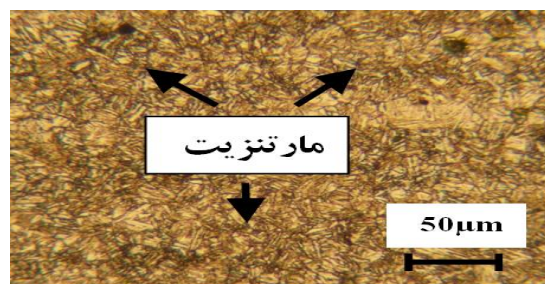
(ج)

شکل (۴): دانه‌های آستنیت فولاد ۳۱۶L

(الف): فلز پایه، (ب): منطقه HAZ، (ج): فلز پایه و HAZ

۳-۱-۳- مقایسه اندازه دانه منطقه HAZ

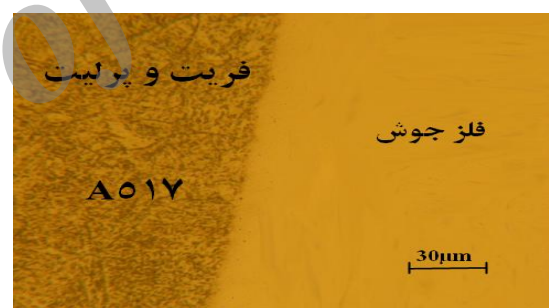
شکل ۵ (الف) و (ب) به ترتیب قطر متوسط دانه‌های منطقه HAZ فولاد ۵۱۷ A و فولاد ۳۱۶L را نشان می‌دهد. با توجه به مقایسه انجام گرفته می‌توان به این نتیجه رسید که



(الف)



(ب)



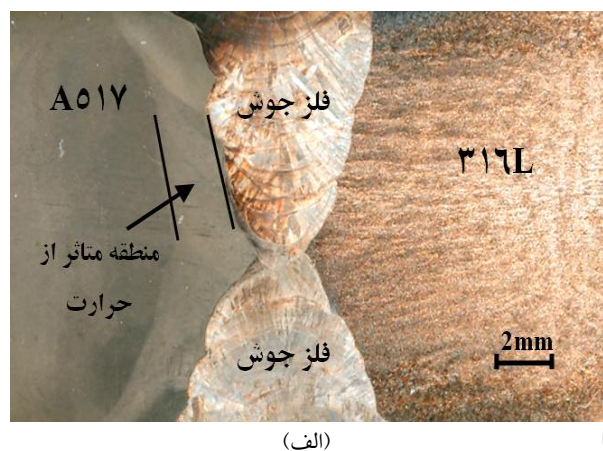
(ج)

شکل (۳): منطقه متأثر از حرارت در فولاد ۵۱۷ A (الف): فلز پایه، (ب): در جوش تنگستن-گاز معمولی، (ج): در جوش تنگستن-گاز پالسی

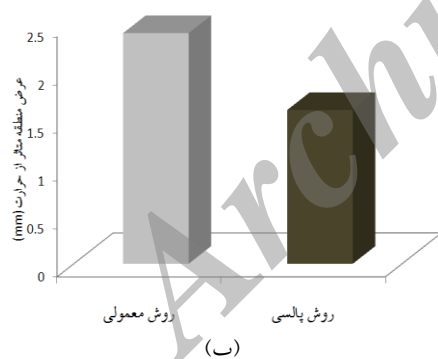
۳-۱-۲- ریز ساختار منطقه متأثر از حرارت (HAZ) فولاد ۳۱۶L

شکل (الف) دانه‌های آستنیت فلز پایه ۳۱۶L را نشان می‌دهد که فاز فریت اولیه در مرز دانه‌های آن قابل تشخیص می‌باشد. شکل (ب) منطقه HAZ فولاد ۳۱۶L در نزدیکی مرز ذوب را نشان می‌دهد. شکل (ج) دانه‌های آستنیت در منطقه متأثر از حرارت در کنار دانه‌های آستنیت فلز پایه را نشان می‌دهد. شکل (د) مرز میان فلز پایه و منطقه متأثر از حرارت فولاد ۳۱۶L مشخص است. با توجه به طرفین این مرز اختلاف در اندازه دانه‌های آستنیت فلز پایه و منطقه HAZ، قابل تشخیص

نسبت به فلز پایه مشخص است. اما در مورد فولاد ۳۱۶L به علت عرض بسیار کم (حدود $150 \mu\text{m}$) منطقه HAZ، این اختلاف مشخص نیست. در شکل ۶(ب) میزان اختلاف عرض منطقه HAZ در فولاد A517 را در دو روش جوشکاری نشان داده شده است. در این شکل این نکته واضح است که به علت کاهش حرارت ورودی در روش جوشکاری پالسی، عرض منطقه HAZ کمتر شده است.



(الف)



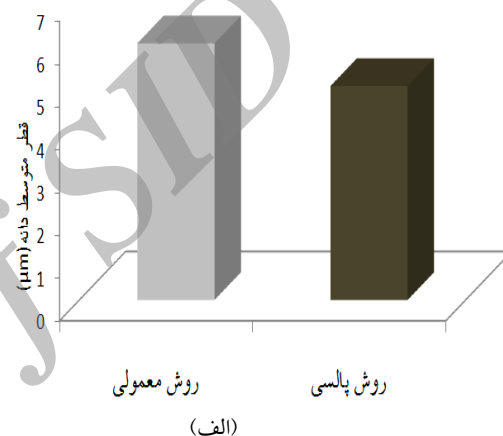
(ب)

شکل ۶(الف): تصویر ماکرواج منطقه HAZ فولاد A517، (ب): عرض منطقه متأثر از حرارت را در فولاد A517 در دو روش جوشکاری معمولی و پالسی

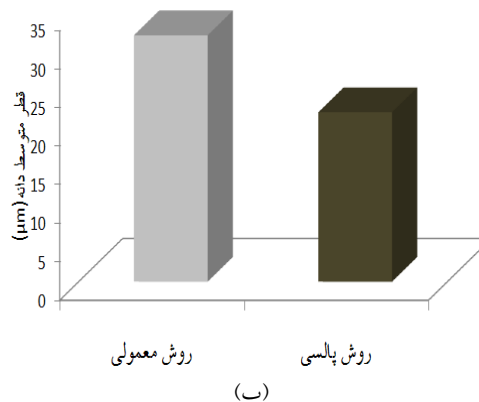
۳-۱-۵- ریز ساختار فلز جوش

ساختار فلز جوش یک ساختار کاملاً آستنیتی است که در آن فریت دلتا^{۱۵} یا رسوبات کاربید دیده نمی‌شود. در این ساختار رشد صفحه‌ای^{۱۶}، سلولی^{۱۷} و دندردیتی^{۱۸} وجود دارد به همراه جدایش عناصری مانند مولیبدن. قسمت

قطر متوسط دانه‌های منطقه HAZ در روش پالسی نسبت به روش معمولی، در هر دو نوع فولاد کاهش پیدا کرده است. کاهش قطر متوسط دانه‌ها به علت کم شدن حرارت ورودی در حین جوشکاری اتفاق افتاده است. می‌توان مشاهده کرد که این کاهش در فولاد ۳۱۶L با شدت بیشتر اما در عرض کمتری به وقوع پیوسته است.



(الف)

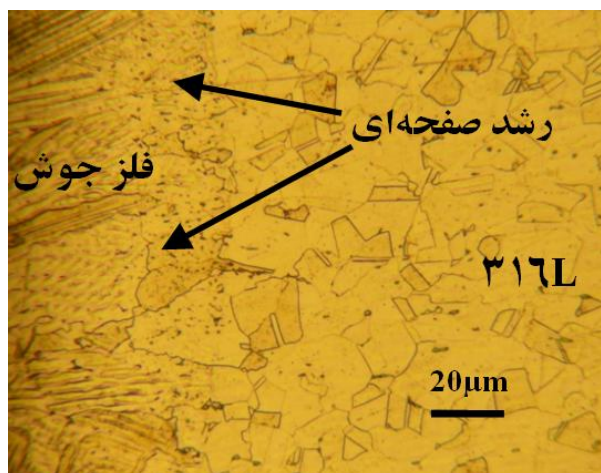


(ب)

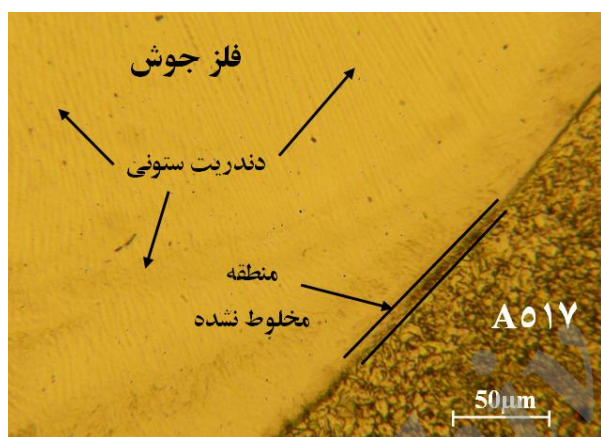
شکل ۵(ب): مقایسه قطر متوسط دانه‌های منطقه متأثر از حرارت در دو روش جوش (الف): فولاد A517، (ب): فولاد ۳۱۶L

۳-۱-۴- عرض منطقه HAZ

در شکل ۶(الف) عرض منطقه متأثر از حرارت فولاد A517 در ماکرواج نشان داده شده است. در این شکل منطقه متأثر از حرارت با رنگی متفاوت (بین دو خط سیاه)



(ب)



(ج)

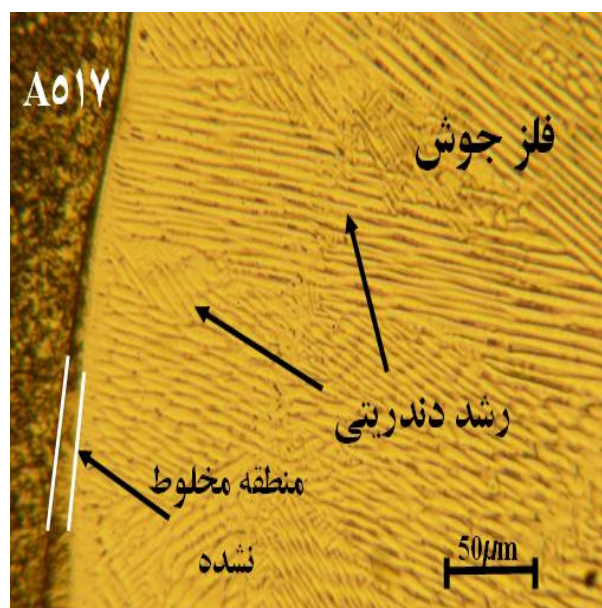
شکل (۷): (الف): ساختار فلز جوش مجاور فولاد ۳۱۶L، (ب): رشد صفحه ای در بزرگ نمایی بیشتر (ج): ساختار فلز جوش مجاور فولاد A517

رشد صفحه ای و سلولی، جهت عمود بر مرز جوش و در جهت رشد آسان (۱۰۰) می باشد [۱۰،۹،۸] و در ادامه به رشد رقابتی تبدیل شده است که مخلوطی از رشدهای ستونی دندریتی می باشد. اما در شکل (ج) در فلز جوش مجاور فولاد A517 مشاهده می گردد به علت انتقال حرارت سریع تر از طریق فولاد A517 نسبت به فولاد زنگ نزن، رشد از نوع دندریتی ستونی بسیار ظریف بوده که در ادامه تا نزدیکی مرکز جوش ادامه پیدا می کند در حالی که فلز جوش مجاور فولاد ۳۱۶L هر سه نوع رشد را دارا بوده و ضمناً بسیار خشن تر از ساختار فلز جوش در مجاور فولاد A517 می باشد. در این جا به علت افزایش فاکتور (GR) (G=گرادیان دما) و (R=نرخ رشد) ساختار جوش

عمده عناصر موجود در فلز جوش را آهن، کروم و نیکل تشکیل می دهند که کمترین تمایل را به جدایش در ساختار دندریتی و درون دانه ای دارند [۷]. در شکل (۷) ریز ساختار فلز جوش در مجاورت فولاد A517 و ۳۱۶L نشان داده شده است. در شکل (الف) فلز جوش مجاور فولاد زنگ نزن ۳۱۶L مشاهده می شود که بعد از منطقه مخلوط نشده^{۱۹} مقداری رشد صفحه ای وجود دارد و بعد از این منطقه در بعضی نقاط رشد سلولی و بعد از آن رشد دندریتی تا مرکز جوش ادامه دارد. شکل (ب) رشد صفحه ای در بزرگ نمایی بیشتر نشان داده شده است. در این شکل می توان جهت گیری دانه ها در رشد صفحه ای را مشاهده کرد که در جهت دانه های فلز پایه می باشند. علت این امر تشابه شبکه کریستالی فلز جوش ۳۰۹ MoL با ساختار آستنیتی با فلز پایه ۳۱۶L می باشد زیرا فلز پرکننده ۳۰۹ MoL و فلز پایه ۳۱۶L اساساً از نوع آستنیتی می باشند. و حال از آنجایی که ساختار هر دو فلز (۳۱۶L و ۳۰۹ MoL) هر دو آستنیتی بوده و ساختار آستنیتی نیز دارای شبکه کریستالی FCC می باشد، در نتیجه ساختار کریستالی هر دو فلز یاد شده یکسان می باشد [۸]. لازم به ذکر است منطقه مخلوط نشده شامل قسمتی از فلز پایه می باشد که در حین عملیات ذوب شده ولی با فلز جوش مخلوط نشده است و در هر دو فلز پایه (A517 و ۳۱۶L) قابل مشاهده است.



(الف)



(الف)



(ب)

در روش پالسی ظریف تر است [۱۱]. در این شکل به علت اختلاف ترکیب و ساختار کریستالی FCC فولاد A517 و BCC فلز جوش، رشد صفحه‌ای وجود ندارد و بعد از منطقه مخلوط نشده رشد رقابتی از نوع دندریتی آغاز شده است که تا مرکز جوش پیش رفته است [۶].

رشد رقابتی به علت اختلاف در جهت گیری دانه های در حال رشد با جهت انتقال حرارت می‌باشد و هر دانه‌ای جهت رشد آسان آن هم جهت با مسیر انتقال حرارت باشد، رشد بیشتری دارد به همین دلیل است که بعضی از ستون‌ها تا مرکز جوش ادامه داشته اما بعضی دیگر در همان ابتدا با برخورد به ستون‌های دیگر، رشد آنها متوقف می‌شود.

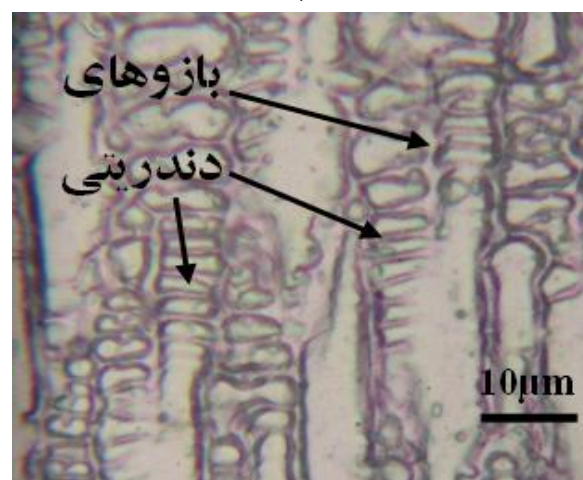
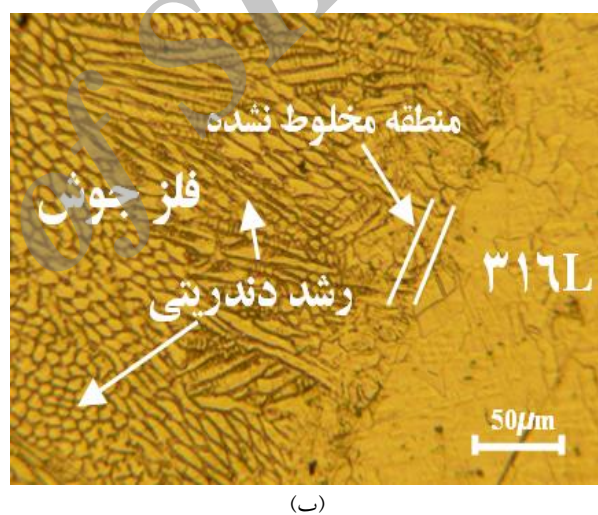
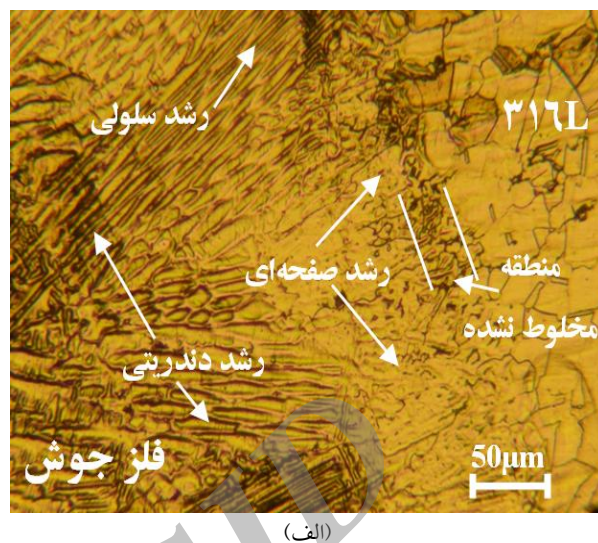
شکل (۸) فلز جوش مجاور فولاد A517 در دو روش جوشکاری نشان داده شده است. در شکل ۸ (الف) مشاهده می‌شود در روش تنگستن - گاز معمولی به علت حرارت ورودی بیشتر و کاهش ضریب GR ستون‌های دندریتی نسبت به جوش پالسی ضخیم تر و بعضاً با طول کمتر می‌باشد [۱۱]. نکته قابل توجه این است که منطقه مخلوط نشده در هر دو روش جوشکاری قابل مشاهده است با این تفاوت که در روش معمولی این منطقه دارای وضوح و پهنای بیشتر می‌باشد. دلیل این امر مربوط به افزایش رقت^{۲۰} به دلیل افزایش حرارت ورودی در روش معمولی نسبت به روش پالسی است. در این حالت مقدار بیشتری از فلز پایه ذوب شده اما با فلز جوش مخلوط نمی‌گردد.

شکل (۸): ساختار فلز جوش مجاور فولاد A517. (الف): در جوش معمولی،

(ب): در جوش پالسی

شکل (۹) (الف) و (ب) فلز جوش مجاور فولاد ۳۱۶L در دو روش جوشکاری نشان داده است. مشاهده می‌شود. در روش معمولی تقریباً هر سه نوع رشد صفحه‌ای، سلولی و دندریتی دیده می‌شود. اما در جوش پالسی شامل منطقه کوچکی از رشد، صفحه‌ای بوده و بعد از آن به رشد دندریتی تبدیل شده است. علت تبدیل رشد صفحه‌ای به سلولی و دندریتی با نزدیک شدن به مرکز جوش کاهش نسبت (G/R) می‌باشد. با حرکت به طرف مرکز جوش این نسبت کاهش یافته و رشد از صفحه‌ای به دندریتی تغییر می‌کند. ساختار دندریتی در روش پالسی به علت حرارت ورودی کمتر و سرعت سرد شدن بیشتر نسبت به روش جوش معمولی ظریف‌تر و طول بازوی دندریتی کوچکتر می‌باشد [۱۱].

رشد صفحه‌ای در هر دو روش جوشکاری در مجاورت فولاد ۳۱۶L به علت تشابه شبکه کریستالی FCC فلز پایه و فلز جوش ۳۰۹ MoL می‌باشد با این تفاوت که منطقه رشد صفحه‌ای در روش معمولی عریض‌تر است زیرا با داشتن حرارت ورودی بیشتر دانه‌های هم ساختار با فلز پایه فرصت بیش‌تری جهت رشد پیدا می‌کنند. این در حالی است که در فلز جوش مجاور فولاد A517 این نوع رشد دیده نمی‌شود [۶]. شکل ۹ (ج) بازوهای دندریتی را نشان می‌دهد که در جهات مختلف قرار گرفته‌اند. شکل (۱۰) (الف) و (ب) مقایسه طول بازوی دندریتی را برای دو فلز پایه مختلف هر روش جوشکاری را نشان می‌دهد.



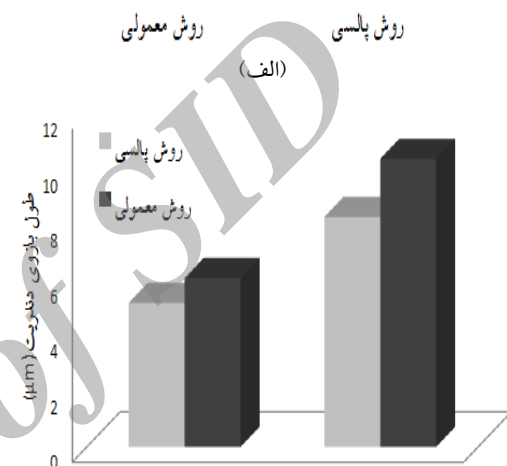
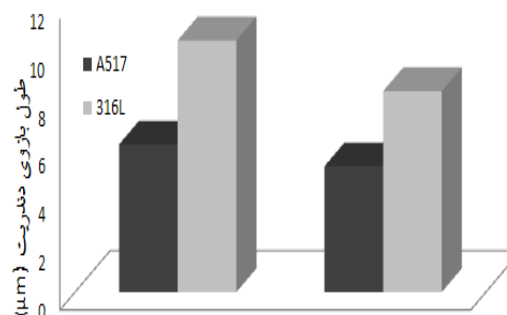
شکل (۹): (الف): ساختار فلز جوش مجاور فولاد 316L در جوش معمولی، (ب): ساختار فلز جوش مجاور فولاد 316L در جوش پالسی، (ج): بازوهای

دندریتی

جوشکاری معمولی نسبت به فلز جوش مجاور همین فولاد در روش پالسی، افزایش حرارت ورودی در روش معمولی نسبت به روش پالسی است و کم شدن ضریب GR می‌باشد. برای فلز جوش مجاور فولاد ۳۱۶L نیز همین استدلال را می‌توان بیان کرد.

تشکیل منطقه مخلوط نشده وقتی است که محدوده نقطه ذوب فلز جوش نزدیک یا بالاتر از فلز پایه باشد کسر کوچکی از فلز پایه ذوب شده ولی با فلز جوش مخلوط نمی‌گردد بنابراین منطقه مخلوط نشده بین دو منطقه فلز پایه و فلز جوش تشکیل می‌گردد [۱۲، ۱۳]. این منطقه در طرف دیگر جوش در مجاورت فولاد A517 نیز رخ داده است. در شکل (۷) (الف) و (ج) با اینکه منطقه مخلوط نشده در مرز جوش هر دو فلز پایه دیده می‌شود ولی این منطقه در مجاورت فولاد ۳۱۶L عریض‌تر و واضح‌تر می‌باشد که علت این امر می‌تواند در رابطه با تشابه ترکیب شیمیایی و نقطه ذوب فولاد پایه ۳۱۶L با فلز جوش باشد [۵]. در شکل (۱۱) اختلاف میزان رقت در دو روش نشان داده شده است. در روش پالسی به علت حرارت ورودی کمتر، فلز پایه کمتری ذوب شده است در نتیجه میزان رقت که شامل تقسیم مساحت فلز جوش ذوب شده (Abm) به مجموع فلز جوش و فلز پایه (Abm+Awm) (رابطه ۲) ذوب شده می‌باشد که در این تحقیق از طریق روش متالوگرافی ماکرو اندازه‌گیری شده، است کاهش پیدا کرده است [۱۵].

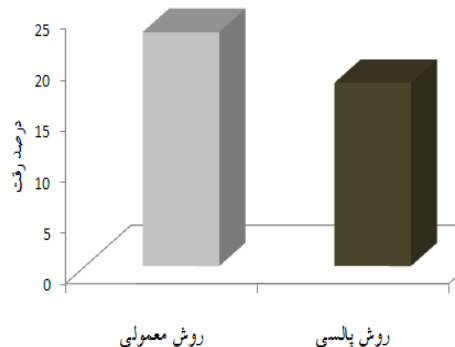
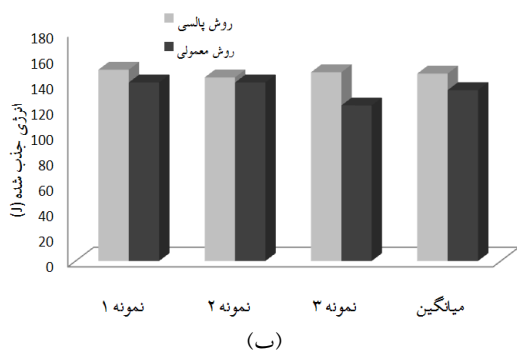
$$\text{میزان رقت} = \frac{A_{bm}}{A_{bm} + A_{wm}} \quad (2)$$



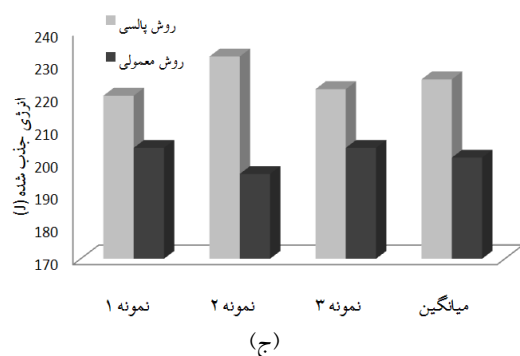
شکل (۱۰) (ب)

شکل (۱۰): (الف): طول بازوی دندریت مجاور فلزات پایه در هر دو روش جوشکاری معمولی و پالسی، (ب): طول بازوی دندریت در مجاورت فلزات پایه A517 و 316L در هر دو روش جوشکاری به طور جداگانه

در شکل (الف) مشاهده می‌گردد طول بازوهای دندریتی فلز جوش مجاور فولاد ۳۱۶L به طور محسوس از طرف دیگر که در مجاورت فولاد A517 است، بزرگ‌تر می‌باشد. همانطور که قبلاً ذکر شد این امر به دلیل تشابه فولاد ۳۱۶L با فلز جوش ساختار و انتقال حرارت سریع‌تر و افزایش ضریب GR در فولاد کوئنچ-تمپر نسبت به فولاد زنگ نزن می‌باشد. در شکل (ب) در اصل همان شکل (الف) است با این تفاوت که اختلاف طول بازوی دندریتی را برای فلز جوش مجاور هر فولاد به طور جداگانه نشان داده است. علت بزرگی اندازه بازوی دندریتی فلز جوش مجاور فولاد A517 روش



شکل (۱۱): درصد رقت در دو روش جوشکاری تنگستن-گاز معمولی



شکل (۱۲): میزان انرژی جذب شده در دو روش جوشکاری معمولی و پالسی، (الف): در منطقه متأثر از حرارت فولاد A517، (ب): در فلز جوش، (ج): در منطقه متأثر از حرارت فولاد ۳۱۶L

۲-۴- بررسی سطوح شکست

شکل (۱۳) (الف) و (ب) مقطع شکست فلز جوش را در دو روش جوشکاری نشان می‌دهد شکست در هر دو روش از نوع نرم می‌باشد. اما سطح شکست در روش پالسی دارای دیمپل‌های بسیار ریزتر نسبت به روش معمولی است که این موضوع ظریف‌تر بودن ساختار فلز جوش و کم شدن طول بازوهای دندریتی در روش پالسی می‌باشد. نکته قابل توجه این است که در هیچ‌کدام از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی سطح شکست فاز دیگری که به صورت ذرات درون دیمپل‌ها وجود داشته باشد، یافت نشد.

شکل (۱۴) (الف) و (ب) به ترتیب سطح شکست منطقه متأثر از حرارت فولاد ۳۱۶L در روش جوش معمولی و پالسی را نشان می‌دهد. به وضوح مشخص است سطح شکست در روش

و پالسی

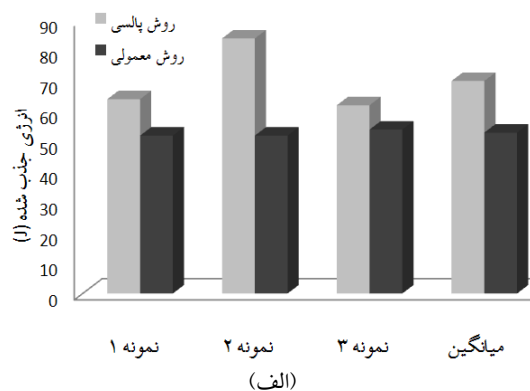
۲-۳- بررسی خواص مکانیکی

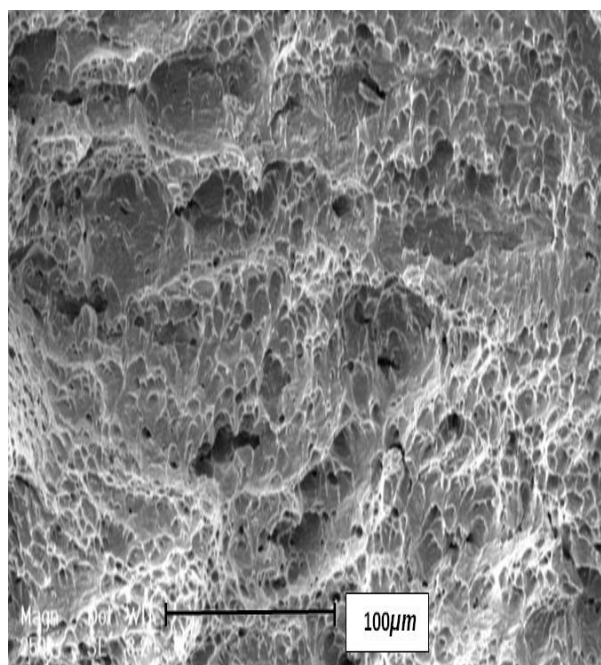
۲-۳-۱- بررسی نتایج آزمایش ضربه

شکل (۱۲) (الف، ب، ج) به طور کلی این نکته را بیان می‌کند که کلیه نمونه‌های ضربه در تمام مناطق (منطقه متأثر از حرارت و فلز جوش)، انرژی ضربه در روش جوش پالسی افزایش پیدا کرده است. این افزایش بیانگر این واقعیت است که بر اساس رابطه هال-پچ (رابطه ۳)، با کوچک شدن قطر دانه‌ها در روش پالسی و زیاد شدن مرز دانه‌ها، تنش تسلیم و در نهایت مقاومت نمونه های جوش پالسی افزایش داشته است.

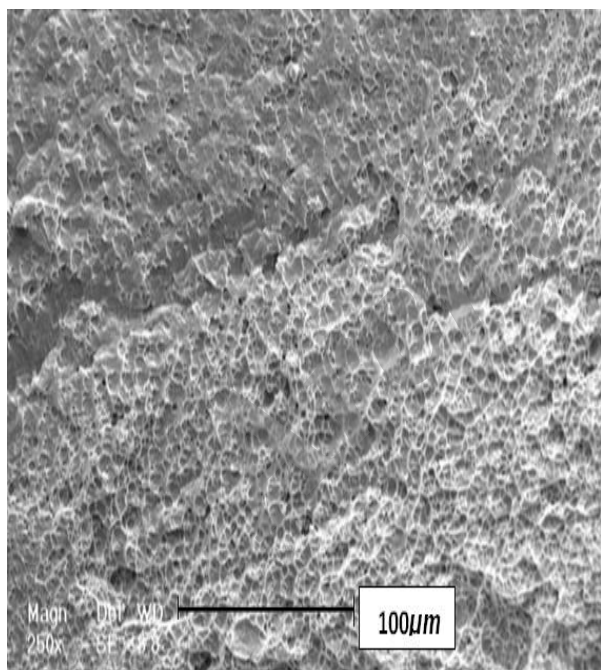
$$\sigma_y = \sigma_i + k/\sqrt{D} \quad (۳)$$

در جایی که σ_y تنش تسلیم، σ_i تنش اصطکاکی شبکه، k پارامتر قفل شوندگی مرز دانه و D قطر متوسط دانه می‌باشد.





(الف)

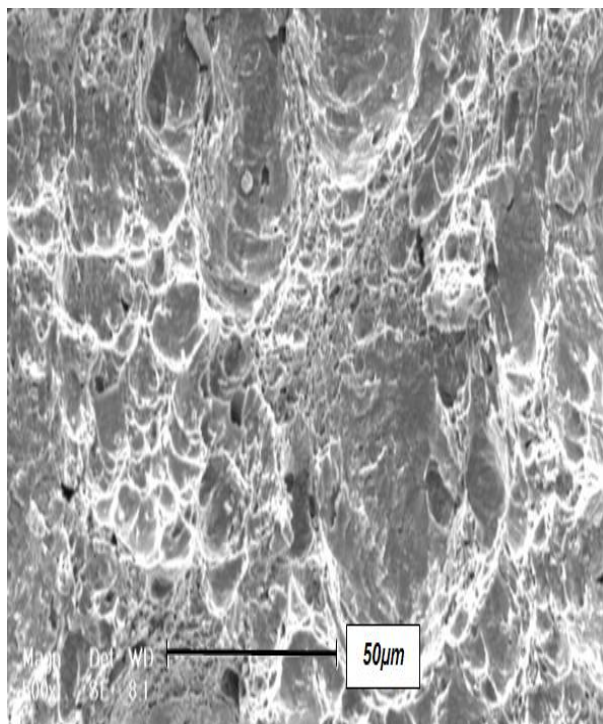


(ب)

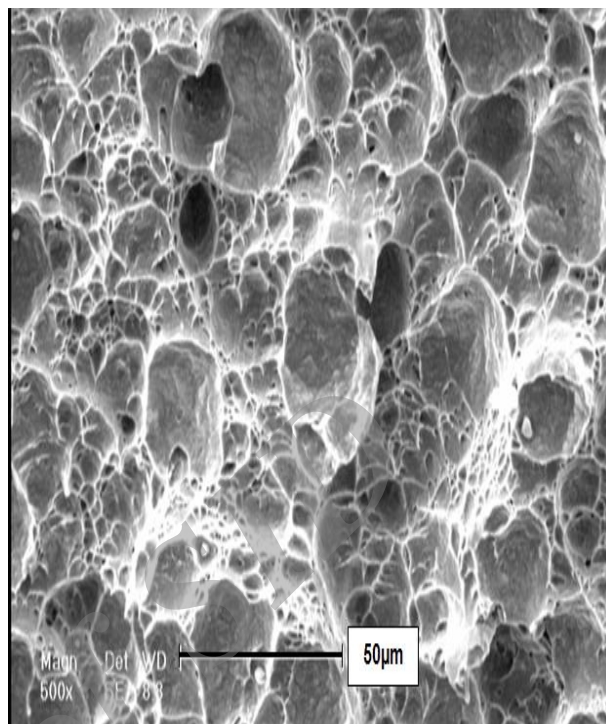
شکل (۱۳): سطح شکست فلز جوش، (الف): در روش تنگستن-گاز معمولی، (ب): در روش تنگستن-گاز پالسی

معمولی و پالسی به صورت کاملاً نرم می‌باشد. با این تفاوت که به علت کاهش شدید اندازه دانه در روش جوش پالسی، دیمپل‌های سطح شکست در روش پالسی بسیار کوچکتر از روش معمولی می‌باشد.

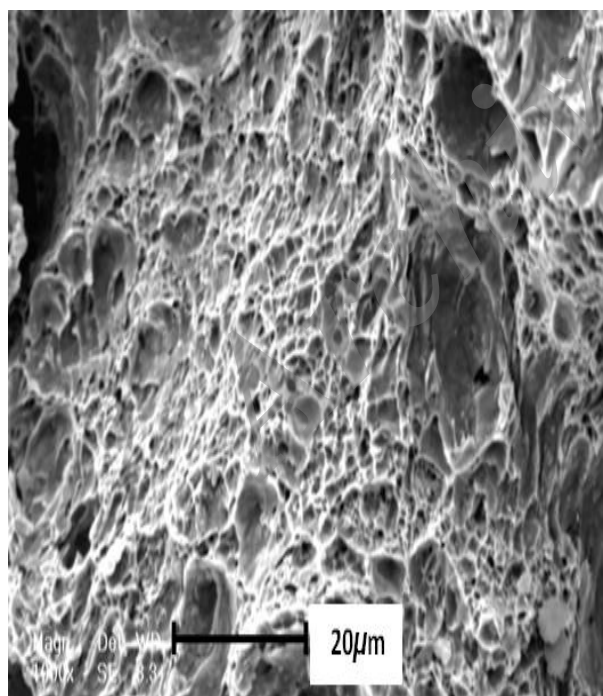
شکل ۱۵(الف) سطح شکست قسمت نرم منطقه متأثر از حرارت فولاد A517 نشان داده شده است. شکست در شکل ۱۵(الف) مربوط به جوش معمولی از نوع نیمه ترد بوده و در شکل ۱۵(ب) مربوط به جوش پالسی از نوع نرم می‌باشد. مقایسه سطح شکست شکل ۱۵(الف) با (ب) نشان می‌دهد سطح شکست در جوش پالسی تقریباً به صورت دیمپل‌های ریز می‌باشد اما در روش معمولی شکل ۱۵(الف) سطح شکست دارای دیمپل‌های بزرگ و عمیق بوده و در بعضی نقاط دارای صفحات تورق در بین ساختار شکست می‌باشد. دیمپل‌های ریز تر در سطح شکست جوش پالسی باعث افزایش انرژی ضربه نسبت به جوش معمولی می‌گردد که این خود نتیجه کوچکتر بودن دانه در منطقه متأثر از حرارت جوش پالسی نسبت به جوش معمولی در فولاد A517 است. نتایج نشان داد به علت افزایش کم قطر دانه در روش پالسی نسبت به معمولی، تقریباً کمترین افزایش انرژی ضربه در این روش می‌باشد. دلیل دیگر را می‌توان در نوع شکست منطقه متأثر از حرارت فولاد A517 جستجو کرد. در جایی که اصولاً به علت داشتن ساختار مارتنزیتی این نوع فولاد، حالت شکست مخلوطی از شکست نرم و کاملاً ترد می‌باشد. به همین دلیل افزایش انرژی ضربه نسبت به بقیه مناطق کمتر است. شکل ۱۶(الف) و (ب) سطح شکست کاملاً ترد فولاد A517 را نشان می‌دهد. در این شکل کاملاً مشخص است که در قسمتی از سطح شکست در دو روش جوشکاری شکست تماماً از نوع ترد می‌باشد و تقریباً هیچ فرقی بین این دو روش وجود ندارد.



(الف)

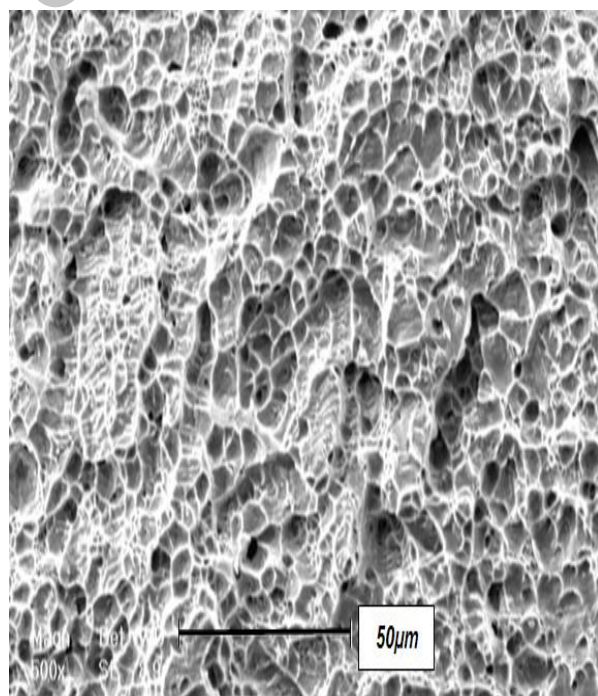


(الف)



(ب)

شکل (۱۵): سطح شکست نرم منطقه متأثر از حرارت فلز ۵۱۷ A، (الف): در روش تنگستن-گاز معمولی، (ب): در روش تنگستن-گاز پالسی



شکل (۱۴) (ب)

شکل (۱۴): سطح شکست منطقه متأثر از حرارت فولاد ۳۱۶L، (الف): در روش تنگستن-گاز معمولی، (ب): در روش تنگستن-گاز پالسی

۳- کاهش حرارت ورودی باعث کم شدن طول بازوی دندریتی فلز جوش مجاور فولاد A517 از $6/2 \mu\text{m}$ به $5/1 \mu\text{m}$ و در فلز جوش مجاور فولاد 316L از $10/4 \mu\text{m}$ به $8/3 \mu\text{m}$ ، می شود.

۴- استفاده از روش پالسی باعث کاهش عرض منطقه متاثر از حرارت فلزات پایه A517 از $2/4 \text{ mm}$ به $1/6 \text{ mm}$ می گردد.

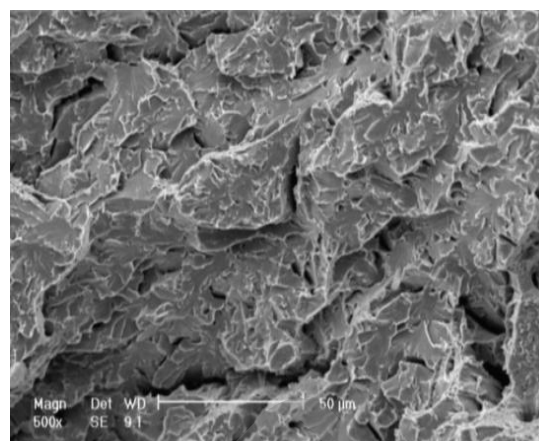
۵- بهینه کردن پارامترهای جوشکاری در جوش پالسی باعث کم شدن اندازه دانه فریت منطقه متاثر از حرارت فولاد A517 از $6/4 \mu\text{m}$ به $5/6 \mu\text{m}$ و همچنین کاهش اندازه دانه آستنیت منطقه HAZ فولاد 316L از $33 \mu\text{m}$ به $22 \mu\text{m}$ در نزدیکی مرز جوش می گردد.

۶- منطقه مخلوط نشده در هر دو فلز پایه تشکیل شده است با این تفاوت که منطقه مخلوط نشده در فولاد 316L دارای وسعت و وضوح بیشتری نسبت به منطقه مخلوط نشده فولاد A517 می باشد. همچنین منطقه مخلوط نشده در جوش معمولی دارای پهنای بیشتری است.

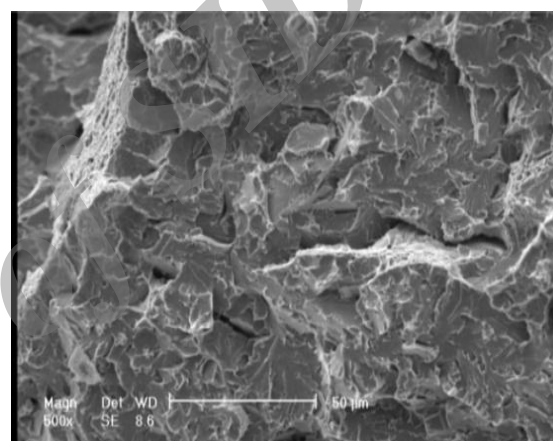
۷- میزان رقت ۵ درصد کاهش داشته و از ۳۳ درصد در روش معمولی، به ۲۸ درصد در روش پالسی رسیده است.

۸- میزان انرژی ضربه در تمام مناطق در روش پالسی افزایش داشته و در منطقه متاثر از حرارت فولاد 316L از ۲۰۰ به ۲۲۵ ژول، در منطقه متاثر از حرارت فولاد A517 از ۵۳ به ۷۰ ژول و در فلز جوش از ۱۳۳ به ۱۵۰ ژول رسیده است.

۹- نتایج نشان داد سطح شکست در منطقه متاثر از حرارت فولاد A517 مخلوطی از شکست نرم و ترد است. همچنین بررسی ها نشان داد شکست در فلز جوش و منطقه متاثر از حرارت فولاد 316L کاملاً نرم می باشد و هیچ گونه ترک و ترکیبات کاربیدی در سطح شکست دیده نشد.



(الف)



(ب)

شکل (۱۶): سطح شکست ترد منطقه متاثر از حرارت فولاد A517، (الف) در روش تنگستن-گاز معمولی، (ب) در روش تنگستن-گاز پالسی

۴- نتیجه گیری

- ۱- ساختار فلز جوش در هر دو روش جوشکاری کاملاً آستینیتی می باشد که عمدتاً شامل آهن، کروم و نیکل است.
- ۲- نوع رشد فلز جوش در مجاورت فولاد 316L شامل رشد صفحه ای به همراه رشد سلولی و دندریتی تا مرکز جوش می باشد ولی در مجاورت فولاد A517، بدون رشد صفحه ای و فقط سلولی و دندریتی بسیار ظریف است.

۵- مراجع

- [3] F.J. Winsor, in ASM Handbook, , Welding, Brazing and Soldering, ASM International Materials Park , OH, Vol. 6, pp.662, 1993.
- [4] J.Norrish," Advanced welding processes", Abington,Wood Head Publishing, 2006.
- [1] C .Tseng, W. Savage, Welding Journal, Vol.50,pp.777, 1971.
- [2] W. Savge, F.C.D. Lundin, R.J. Hrubec, Welding Journal Vol. 47, pp.420, 1968.

- welds alloy 800 and HP heat – resistant steel", Mater Charact, Vol.59, pp.1447-54, 2008.
- [14] H. Naffakh. "Dissimilar welding of AISI austenitic stainless steel to nickel – based alloy Inconel 657", Journal of Material Processing Thechnology , Vol.209, pp.3628-3639, 2009.
- [15] J.N. Depont, W. Banovic. & A.R. Marder, "Microstructural evolution and weldability of dissimilar welds between a super austenitic stainless steel and nickel based alloys", Weld, Journal, Vol.82, pp.125-135, 2003.
- [5] G.A. Chadwick, "Metallography of Phase Transformations", Crane, Russak and Co, New York, 1972.
- [6] S. Kou. "Welding metallurgy", Second ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons Inc, 2003.
- [7] H. Shahhoseini, M. Shamanian & A. Kermanpour, "Characterization of microstructures and properties of Inconel 617/310 Stainless steel dissimilar welds", Mater Charact, Vol.62, pp.425-431, 2011 .
- [8] T.Iamboliev, " Interpretation of Phase Formation in Austenitic Stainless Steel Welds", Supplement to The Welding Society and The Welding Journal, Dec 2003.
- [9] Chalmers, " Principle of Solidification" , Wiley, New York, pp.117, 1964.
- [10] M. Rappa, S.A. David, in Resent Trends in Welding Science and Technology, Eds. S. A. David and J. M. Vitek, ASM International, Material Park, OH, pp.14, 1989.
- [11] C.M. Fleming, "Solidification Processing", McGraw-Hill, New York, 1974 .
- [12] M. Sireesha, S.K. Albert, V. Shankar & S. Sundaresan. " A comparative evaluation of welding consumables for dissimilar welds between 316LN austenitic stainless steel and alloy 800", J. Nucl Master, pp.279-76, 2000.
- [13] R. Dehmolaie, M. Shamanian & A. Kermanpour, "Microstructural characterization of dissimilar

۶- پی نوشت

- [1] Heat Affected Zone
 [2] Scanning Electron Microscopy
 [3] Electro Slag
 [4] Submerge Arc Welding
 [5] Tseng
 [6] Savage
 [7] Beveling
 [8] Preheat
 [9] Average Current
 [10] Light Microscopy
 [11] Weld Metal
 [12] Base Metal
 [13] Martensite
 [14] Ferrite-Pearlite
 [15] Delta Ferrite
 [16] Epitaxial
 [17] Cellular
 [18] Dendritic
 [19] Unmixed Zone
 [20] Dilution