

Microstructural and mechanical evaluation of 15-5PH SS/BNi-3/15-5PH SS bonded by TLP process

Masoud Mosallae^{1,*}, Mohammad Amin Naderi², Mostafa Houshang³ and Afshin Babanejad⁴

1,* Associate Professor, Material Science group, Engineering Faculty, Yazd University, Yazd, Iran,

mosal@yazd.ac.ir

2. B.S student, Material Science group, Engineering Faculty, Yazd University, Yazd, Iran,

mohammadamin.ndr@gmail.com

3- M.S student, Material Science group, Engineering Faculty, Yazd University, Yazd, Iran,

M68.hooshangi@gmail.com

4- Assistance professor, Yazd University, Iran, afshinbabanejhad@yahoo.com

Abstract: In the present study, Transient Liquid Phase (TLP) bonding of 15-5PH stainless steel was carried out by using BNi-3 interlayer. The bonding process was carried out at 1150°C for 5min and 30min under protection of 99.995% Ar shielding gas. The microstructural investigations of the bonding area was carried by using optical and scanning electron microscopes equipped to EDS analyzer. Cooling the samples before the completion of thermal solidification causes non-isothermal solidification of the remaining melt in the central line of bonding zone and the formation of boride compounds. Microstructural studies showed that increasing the joining time from 5min to 30min results in completion of isothermal solidification and the formation of a uniform nickel-rich solid solution in at the bonding zone. The continuous morphology of the eutectic compounds formed during non-isothermal solidification caused a sharp drop in the shear strength of the bonded specimens. Applying thermal aging treatment after joining led to modification of the size of martensite laths and uniformity hardness in the joint area.

Keywords: TLP bonding, 15-5PH steel, aging heat treatment, microstructure, microhardness.

ارزیابی ریزساختاری و مکانیکی موضع اتصال 15-5PH SS/BNi-3/15-5PH SS متصل شده توسط فرآیند TLP

مسعود مصلاهی پور^{۱*}، محمدامین نادری^۲، مصطفی هوشنگی^۳، افشین بابانزاد^۴

^{۱*} دانشیار، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، ایران؛ mosal@yazd.ac.ir

^۲ دانشجوی کارشناسی، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، ایران؛ mohammadamin.ndr@gmail.com

^۳ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندس معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، ایران؛ M68.hooshangi@gmail.com

^۴ دانشجوی دکترا، دانشکده مهندس معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، ایران؛ afshinbabanejad@yahoo.com

چکیده

در پژوهش حاضر، اتصال فولاد زنگ نزن 15-5PH با فرآیند اتصال دهی فازماید گذرا (TLP) با استفاده از لایه واسط BNi-3 انجام شد. فرآیند اتصال دهی در دمای ۱۱۵۰°C و در مدت زمان‌های ۵min و ۳۰min و با استفاده از گاز محافظ آرگون با خلوص ۹۹/۹۹۵٪ انجام شد. بررسی‌های ریزساختاری اتصالات، بعد از اتصال دهی و با استفاده از میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی روبشی مجهز به آنالیزگر EDS انجام شد. سرد نمودن نمونه‌ها قبل از تکمیل انجماد همدمای موجب انجماد غیرهمدمای باقیمانده در خط مرکزی اتصال و تشکیل ترکیبات بورایدی در مرکز اتصال می‌شود. مطالعات ریزساختاری نشان داد که تغییر زمان اتصال دهی از ۵min به ۳۰min موجب تشکیل انجماد همدمای و تشکیل محلول جامد غنی از نیکل به صورت یکنواخت در موضع اتصال می‌شود. مورفولوژی پیوسته ترکیبات یوتکتیکی موجب افت شدید استحکام برشی نمونه‌ها شد؛ همچنین اعمال عملیات حرارتی پیرسازی بعد از اتصال دهی موجب اصلاح اندازه تیغه‌های مارتنزیت و یکنواخت شدن سختی در ناحیه اتصال شد.

کلمات کلیدی: فرآیند اتصال دهی TLP، فولاد زنگ نزن 15-5PH، عملیات حرارتی پیرسازی، ریزساختار، میکروسختی.

۱- مقدمه

فولاد 15-5PH یک فولاد زنگ نزن رسوب سخت شونده مارتنزیتی حاوی ۱۵wt% کروم، ۵wt% نیکل و ۱/۲wt% مس می‌باشد که به واسطه توزیع رسوبات غنی از مس در زمینه مارتنزیت تیغه‌ای شکل استحکام یافته است [۱]. خصوصیات از قبیل مقاومت به خوردگی مطلوب، استحکام بالا و قابلیت عملیات حرارتی موجب استفاده گسترده این فولاد در صنایع مختلف از جمله پتروشیمی، هوافضا، ساخت پمپ و ... شده است [۲]. هرچند براساس مقدار کم کربن ($C < 0.03\%$) در فولاد 15-5PH انتظار جوش پذیری مناسب برای این فولاد است اما تحقیقات انجام شده بر روی جوشکاری این فولاد، حاکی از افت خواص در ناحیه اتصال فولاد مذکور است. باید در نظر داشت آنچه در این فولاد می‌تواند ایجاد عیب در ساختار جوش کند، وجود فاز مارتنزیت تمپر شده می‌باشد که می‌تواند با وجود هیدروژن تولید ترک هیدروژنی کند، همچنین وجود عناصر ناخالصی در ناحیه اتصال، احتمال ترک گرم در این ناحیه را افزایش می‌دهد [۵]. برای مثال E.Herny و همکاران [۳] خصوصیات فولاد 15-5PH جوشکاری شده با پرتوالکترونی (EB) را مورد ارزیابی قرار دادند و گزارش نمودند که تشکیل کاربید کروم در ناحیه متأثر از حرارت (HAZ) موجب افت مقاومت به خوردگی موضع اتصال می‌شود. Wei Liu و همکاران [۴] جوشکاری هیبریدی لیزر-قوس فولاد زنگ نزن مارتنزیتی 17-4PH را مورد ارزیابی قرار دادند. در این پژوهش صفحات فولاد 17-4PH به ضخامت ۱۹mm با استفاده از سیم پرکن ER630 و در وضعیت پیرسازی H1150 (عملیات حرارتی آنیل محلولی در دمای ۱۰۳۸°C به مدت ۳۰min و عملیات پیرسازی در دمای ۶۲۱°C به مدت ۴hr و سپس سرد کردن در هوا) جوشکاری شدند. آنها دریافتند که در سرعت‌های جوشکاری کمتر از ۲۰mm/s، تخلخل‌های ناحیه مرکزی اتصال در فلز جوش ایجاد می‌شود. علاوه بر این بررسی‌های آنها حاکی از حساسیت بالای فلز جوش به ترک‌های انجمادی می‌باشد.

نظر به اهمیت انتخاب یک فرآیند اتصال مناسب در فرآیند ساخت و تعمیرات، اتصال دهی فاز مایع گذرا (TLP) به عنوان یک فرآیند اتصال دهی که می تواند در موارد متعددی مشکلات جوشکاری را کاهش دهد، مورد توجه پژوهشگران واقع شد [۵].

فرآیند اتصال دهی TLP دربردارنده مزایای لحیم کاری و جوشکاری نفوذی از جمله کاهش زمان پیونددهی، استحکام بالا، خصوصیات مطلوب اتصال ایجاد شده و ... می باشد. در فرآیند اتصال دهی TLP به دلیل انجماد همدم (برخلاف لحیم کاری) در ناحیه اتصال، امکان جدایش و پس زده شدن عناصر آلیاژی و در نتیجه تشکیل فازهای ناخواسته در ناحیه اتصال به شدت کاهش می یابد و ریز ساختار اتصال ایجاد شده مشابه فلز پایه است. در فرآیند اتصال دهی TLP یک لایه واسط حاوی عناصر کاهنده نقطه ذوب مانند P, Si, B بین سطوح اتصال فلز پایه واقع می گردد و اتصال دهی در دمایی بالاتر از نقطه ذوب لایه واسط انجام می شود. با نگهداری نمونه ها در این دما نفوذ متقابل عناصر آلیاژی بین مذاب و فلز پایه موجب تغییر ترکیب شیمیایی فاز مذاب تشکیل شده می شود، نفوذ عناصر کاهنده نقطه ذوب از فلز مذاب به فلز پایه نقطه ذوب محل اتصال را افزایش می دهد و منجر به پیشروی انجماد همدم در ناحیه اتصال می شود. پس از کامل شدن انجماد همدم در محل اتصال، نگهداری بیشتر مجموعه در دمای اتصال دهی و یا دمای بالاتر از آن، منجر به همگن شدن بیشتر ناحیه اتصال از نظر ترکیب شیمیایی و ریزساختار می شود [۶]. Sheng Lu و Qianqian Sun [۷] نفوذ عناصر و خواص مکانیکی اتصال دهی فولاد 15-5PH با لایه واسط BNi-2 را مورد بررسی قرار دادند. آنها گزارش نمودند که در دمای ۱۰۷۵ °C و زمان نگهداری کوتاه ۱۰ min با پس زده شدن بیشتر عناصر کاهنده نقطه ذوب (MPD) در ناحیه مرکزی اتصال، افت استحکام رخ می دهد در نتیجه استحکام اتصال ابتدا افزایش و سپس با طولانی شدن زمان نگهداری و کاهش مقدار فاز ترد در ناحیه انجماد غیر همدم (ASZ) که عمدتاً CrB و Ni₃₁Si₁₂ هستند به تدریج کاهش می یابد.

با توجه به مشکلات همراه با جوشکاری فولاد 15-5PH توسط فرآیندهای جوشکاری قوس الکتریکی و پرتو پراثری و لزوم دسترسی به یک اتصال با کیفیت، در این پژوهش از فرآیند اتصال دهی TLP برای پیونددهی فولاد 15-5PH استفاده شد.

نظر به اهمیت درک ارتباط متقابل تغییرات ریزساختاری و جلوگیری از تشکیل نواحی با خواص مکانیکی نامطلوب و با توجه به حساسیت قطعات متصل شده با فرآیند اتصال دهی TLP به دما و زمان، پژوهش هایی با بررسی این دو پارامتر موثر انجام شده است. در تحقیق حاضر برخلاف تحقیقات گذشته، ریز ساختار و خواص مکانیکی موضع اتصال فولاد 15-5PH در فرآیند اتصال دهی TLP، در زمان های ۵ min و ۳۰ min در دمای ۱۱۵۰ °C مورد بررسی قرار گرفت.

۲- روش تحقیق

۲-۱- مواد مصرفی

در این پژوهش از فولاد زنگ نزن 15-5PH برش داده شده در ابعاد ۵×۵×۱۰ mm به عنوان فلز پایه و از صفحات آمورف BNi-3 با ضخامت ۲۵ μm به عنوان لایه واسط استفاده گردید. ترکیب شیمیایی و محدوده ذوب فلز پایه و لایه واسط در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول (۱). ترکیب شیمیایی و محدوده ذوب فلز پایه و لایه واسط (wt%)

**T _s	*T _L	B	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Nb	Fe	ترکیب شیمیایی
۱۴۰۴ °C	۱۴۴۰ °C	-	۰/۰۴	۰/۲۸	۰/۵۱	۰/۰۲	۰/۰۰۳	۱۴/۵۰	۱/۳۸	۵/۱۷	۱/۴۹	۰/۲۲	پایه	15-5PH
۹۸۴ °C	۱۰۵۴ °C	۳/۲	۰/۰۶	۴/۵۰	-	-	-	۷/۰	-	پایه	-	-	-	لایه واسط

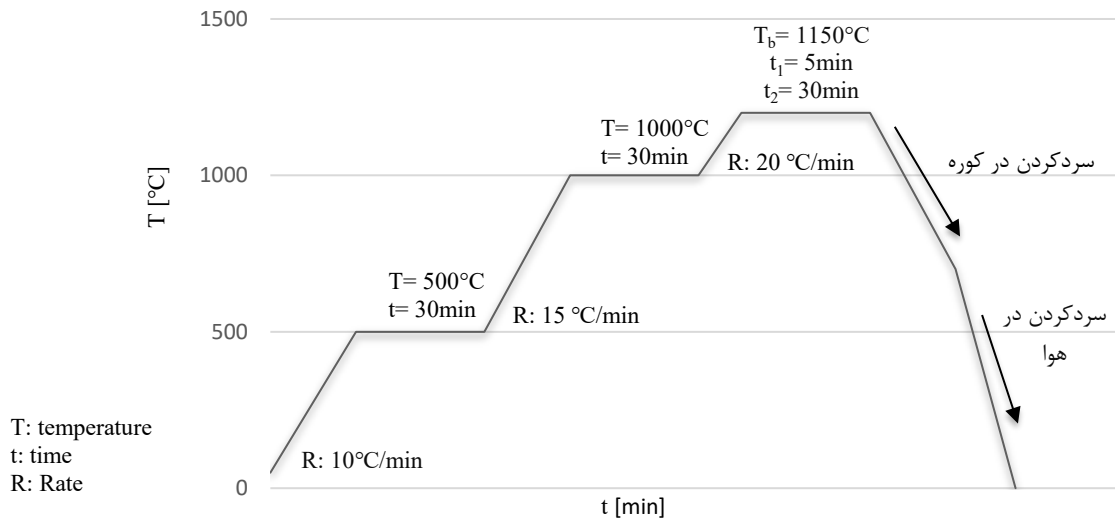
*: دمای لیکوئیدوس

** : دمای سالیدوس

¹ Melting Point Decrease

۲-۲- اتصال دهی TLP

فرآیند اتصال دهی TLP با استفاده از کوره تیوبی تحت اتمسفر خنثی ۹۹/۹۹۵٪ آرگون و در دمای ۱۱۵۰°C و در زمان‌های ۵min و ۳۰min انجام شد. سیکل حرارتی اعمالی به نمونه‌ها در حین اتصال دهی TLP در شکل ۱ نمایش داده شده است.

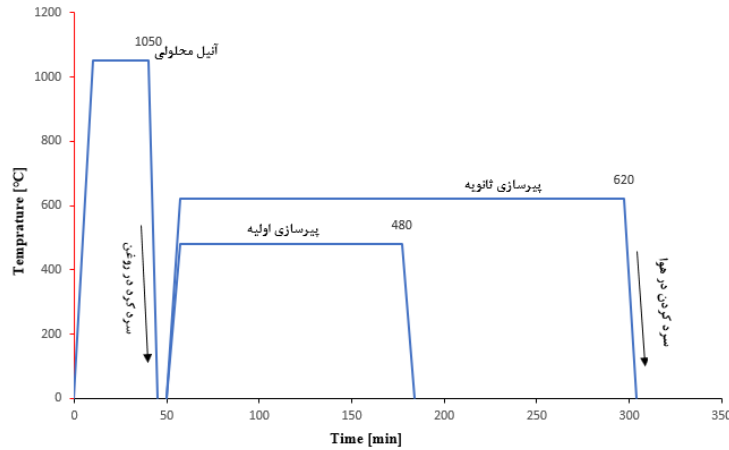


شکل (۱). شماتیک سیکل حرارتی اعمالی به نمونه‌ها در حین اتصال دهی TLP.

برای پاک‌سازی سطحی نمونه‌ها و از بین بردن لایه اکسیدی ایجاد شده در حین تهیه آن‌ها، سطوح تماس نمونه‌ها با استفاده از سنباده ۶۰ تا ۸۰۰ سنباده زنی شدند. نمونه‌های تهیه شده به منظور چربی زدایی و از بین بردن آلودگی‌های روی سطح به مدت ۱۵min در حمام آلتراسونیک حاوی محلول استون قرار گرفتند. لایه واسط BNi-3 نیز در عملیاتی همانند فلز پایه شستشو، چربی زدایی و سپس همراه فلز پایه با دمش هوای گرم کاملاً خشک شدند، در نهایت مورد عملیات اتصال دهی قرار گرفتند.

۲-۳- عملیات حرارتی پیرسازی

برای عملیات حرارتی فولاد 15-5PH، ابتدا نمونه‌ها تحت عملیات آنیل محلولی قرار گرفتند؛ به این صورت که نمونه‌ها به آرامی تا دمای ۱۰۵۰°C گرم شدند و پس از ۳۰ دقیقه توقف در این دما، سریعاً در روغن تا دمای محیط سرد شدند. پس از انجام عملیات آنیل محلولی، نمونه‌ها به مدت ۱۲۰ دقیقه در دمای ۴۸۰°C و ۲۴۰ دقیقه در دمای ۶۲۰°C در کوره حمام نمک با دقت ± 1 قرار گرفتند تا به ترتیب عملیات پیرسازی اولیه و ثانویه روی آن‌ها انجام شود. شکل ۲ سیکل حرارتی این فولاد را نمایش می‌دهد [۸].



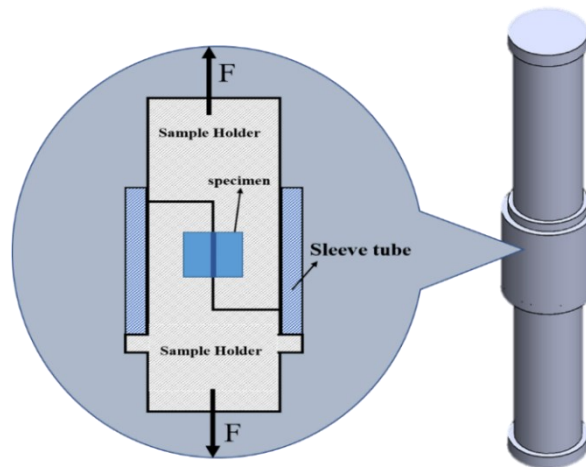
شکل (۲). سیکل عملیات حرارتی نمونه‌های اتصال دهی TLP.

۲-۴- ارزیابی ساختاری

به منظور بررسی های ریزساختاری، نمونه‌های متالوگرافی از مقطع عمود بر اتصال دهی TLP برش زده شدند و عملیات آماده سازی نمونه‌ها با سنباده SiC و در ادامه با پولیش کردن توسط ذرات پودر آلومینا $2\mu\text{m}$ انجام شد. برای مشاهده ریزساختار، نمونه‌ها با استفاده از اچ شیمیایی در محلول ماربل ($10\text{gr CuSo}_4 + 50\text{ml HCl} + 50\text{ml H}_2\text{O}$) و ویلا ($5\text{ml Hydrochloric Acid} + 10\text{gr Picric Acid} + 100\text{ml Ethanol}$) به مدت ۵s اچ شدند. مشاهدات ریزساختاری اولیه توسط میکروسکوپ نوری Olympus مدل PMG3 انجام گرفت و در ادامه برای بررسی دقیق تر از میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM مدل philipsXL3 استفاده شد.

۲-۵- استحکام برشی

برای ارزیابی استحکام برشی، نمونه هایی با ابعاد $10 \times 10 \times 3\text{ mm}$ تهیه شدند و طبق استاندارد AWS B4.0 و JIS K6850، با استفاده از دستگاه کشش یونیورسال SANTAM مدل STM-150 و نیروی 150KN در دمای محیط بانگهدارنده ای از جنس فولاد ساده کربنی CK45 مطابق شکل ۳ تحت آزمون کشش قرار گرفتند. استحکام برشی در نمونه‌ها سه مرتبه تکرار شد و مقدار میانگین به عنوان استحکام برشی نهایی گزارش شد.



شکل (۳). تصویر نگهدارنده قطعات در آزمایش ارزیابی استحکام کششی برشی.

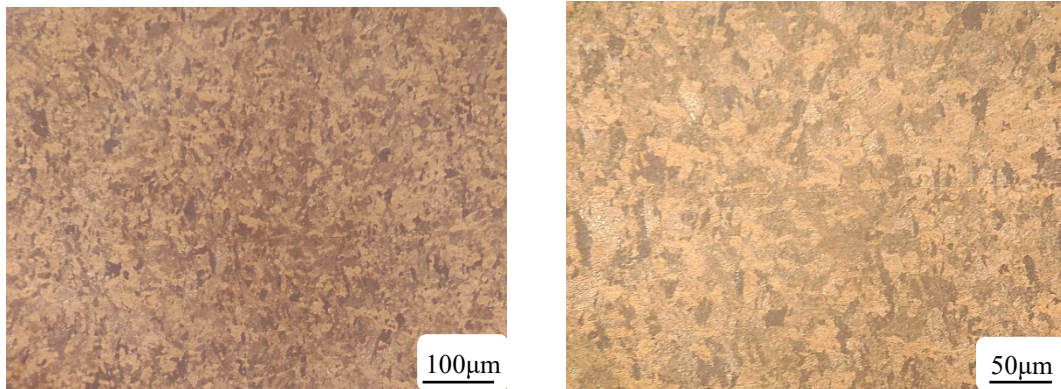
۲-۶- میکروسختی

برای ارزیابی توزیع سختی در نواحی مختلف BM، DAZ، ISZ و امکان مقایسه آنها، از دستگاه میکروسختی Koopa مدل MH3 با نیروی ۱۰N و زمان نشست ۱۰s در جهت عمود بر اتصال ایجاد شده، کمک گرفته شد. سختی در هر نقطه بالغ بر ۵ بار تکرار و مقدار متوسط آن به عنوان سختی آن نقطه گزارش شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ارزیابی ریزساختار فلز پایه

ریزساختار فلز پایه، فولاد زنگ نزن 15-5PH با دوبرگنمایی متفاوت در شکل ۴ نشان داده شده است.

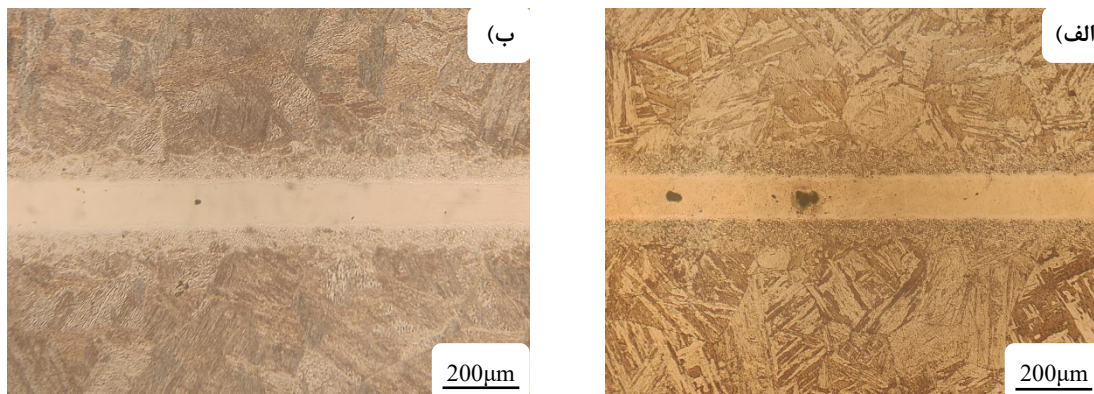


شکل (۴). تصاویر دریافتی از ریزساختار فلز پایه در دو بزرگنمایی متفاوت.

فولاد 15-5PH یک فولاد رسوب سخت شونده مارتنزیتی است که عامل رسوب سختی در آن مس می‌باشد. ریزساختار این فولاد شامل دو فاز مارتنزیت و فریت δ (کمتر از ۱۰ درصد) است که فاز زمینه مارتنزیتی است. وجود فریت در ریزساختار باعث کاهش استحکام در جهت ضخامت می‌شود و هرچه مقدار فریت موجود در این فولاد کاهش یابد، خواص مکانیکی از جمله استحکام در جهت ضخامت افزایش می‌یابد [۱۰].

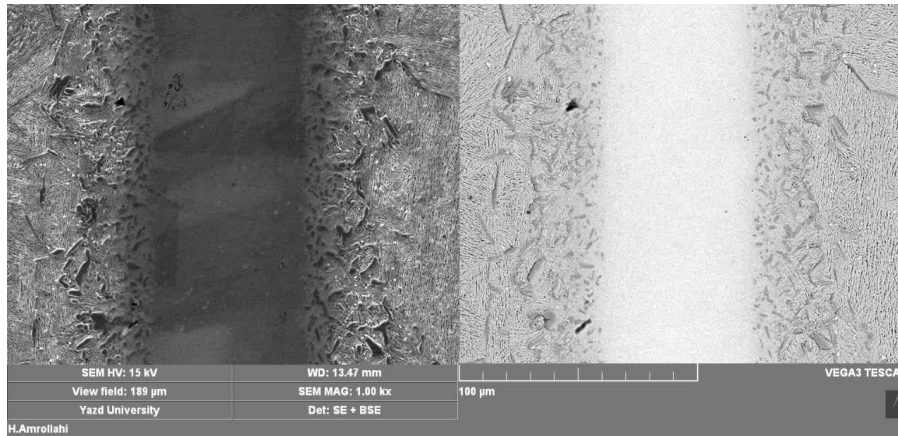
۳-۲- بررسی ریزساختار موضع اتصال در زمان‌های ۵min و ۳۰min

تاثیر زمان اتصال دهی بر ناحیه اتصال فولاد زنگ‌نزن رسوب سخت‌شونده 15-5PH در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل (۵). تاثیر زمان اتصال دهی بر ریزساختار موضع اتصال؛ (الف) زمان ۵min، (ب) ۳۰min.

بررسی‌های ریزساختاری نشان داد زمان اتصال دهی تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر اتصال دهی TLP مجموعه 15-5PH SS/BNi-3/15-5PH SS دارد. باتوجه به این تصاویر با افزایش زمان اتصال دهی، تیغه‌های مارتنزیتی و به دنبال آن بسته‌های مارتنزیتی درشت‌تر می‌شوند، به طوری که در زمان اتصال دهی ۳۰ min این بسته‌های مارتنزیتی بصورت درشتی قابل مشاهده هستند. علاوه بر فلز پایه، ناحیه اتصال نیز با اعمال حرارت حین اتصال دهی TLP دستخوش تغییرات گسترده‌ای قرار می‌گیرد. در ناحیه اتصال، باتوجه به اینکه زمان انجماد همدمای کافی نبوده شاهد هر دو منطقه انجماد همدمای و انجماد غیرهمدمای هستیم. در حین گرمایش ناحیه اتصال، پس از رسیدن به نقطه ذوب لایه واسط، به دلیل عدم وجود تعادل ترمودینامیکی در فصل مشترک جامد/مذاب، انحلال جزئی فلز پایه در لایه واسط مذاب صورت می‌گیرد. این امر منجر به رسیدن ترکیب شیمیایی مذاب به ترکیب شیمیایی لیکوئیدوس تعادلی C_L، دردمای اتصال دهی T_B می‌شود و به محض رسیدن به تعادل موضعی، فرآیند انحلال متوقف می‌شود [۹]. وجود ترکیبات تیره رنگ در تصویر ۴-الف بیانگر وجود عناصر زود ذوب و همچنین انجماد غیرهمدمای است. به منظور بررسی دقیق تر ریزساختار از این نمونه تصویر SEM تهیه شد که شکل ۶ نشان‌دهنده تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی این نمونه است.



شکل (۶). تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) ناحیه اتصال در زمان ۳۰ min.

همانطور که از شکل فوق دریافت می‌شود، برخلاف کامل شدن انجماد همدمای که از تشکیل فازهای بین فلزی ترد در مرکز اتصال جلوگیری می‌کند، رسوبات ثانویه در ریزساختار DAZ تا فاصله حدود ۳۰ μm از فصل مشترک با دو نوع متفاوت مورفولوژی، بلوکی و سوزنی شکل تشکیل می‌شوند. به علت نفوذ عناصر لایه واسط به درون فلز پایه، کسر سطحی این رسوبات به صورت گرادینانی از فصل مشترک فلز به سمت فلز پایه کاهش می‌یابد که تشکیل نشدن این رسوبات در فواصل بسیار دور از فصل مشترک فلز پایه/مرکز اتصال و همچنین مورفولوژی این رسوبات، نمایانگر تشکیل این رسوبات توسط واکنش نفوذی حالت جامد می‌باشد.

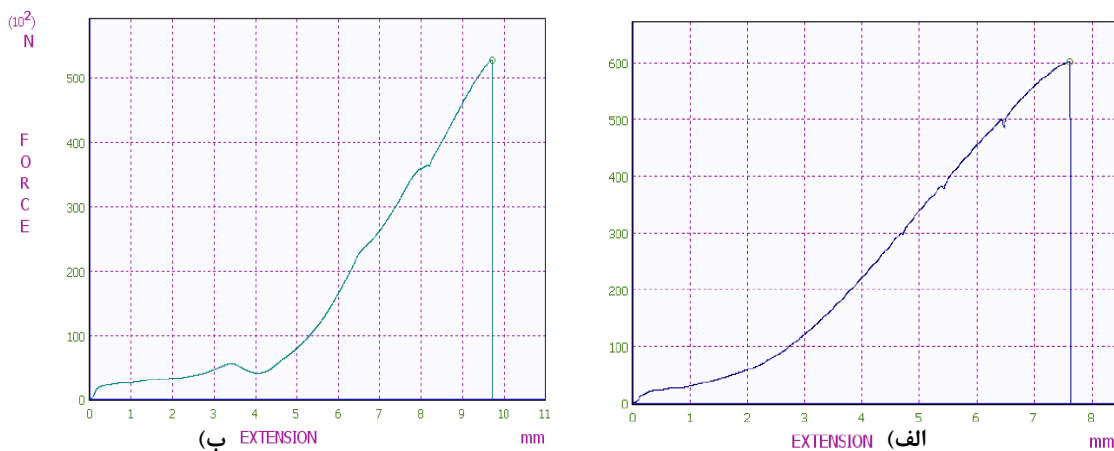
۳-۳- تاثیر عملیات حرارتی پیرسازی

از آنجایی که در دمای عملیات آنیل محلولی حد حلالیت مس در آهن ۷ درصد وزنی است و مقدار مس موجود در زمینه این فولاد تنها ۴ درصد است، در ساختار زمینه مس اضافی نداریم و تمام مس در زمینه حل می‌شود [۱۰]، از طرفی طبق شکل ۲ بعد از عملیات آنیل محلولی، نمونه‌ها سریع در روغن سرد می‌شوند تا ساختار مارتنزیتی حاصل شود، بنابراین اتم‌های مس نمی‌توانند از ساختار خارج شوند و یک زمینه فوق اشباع از مس داریم که دلیل رسوب سختی فولاد 15-5PH ساختار فوق اشباع مس در زمینه است. در عملیات پیرسازی با توجه به اینکه دما کمتر از A₁ است ساختار مارتنزیت سوزنی، تمپر شده و ساختار بدست آمده مشابه فلز پایه مارتنزیت ریز می‌شود [۱۱].

۳-۴- ارزیابی خواص مکانیکی موضع اتصال

۳-۴-۱- استحکام برشی

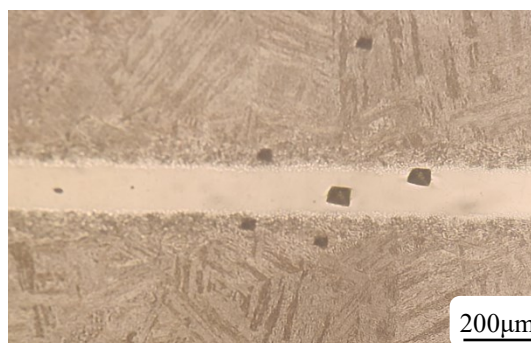
با توجه به شکل ۷ و مقایسه های انجام شده از استحکام برشی نمونه‌ها، با افزایش زمان اتصال دهی از ۵ min به ۳۰ min استحکام برشی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. دلیل این امر کاهش مقدار فازهای ترد و پیوسته تشکیل شده در اثر انجماد غیرهمدمما در ناحیه اتصال می‌باشد. این فازهای ترد در مرکز اتصال به عنوان محلی برای تمرکز تنش عمل می‌کنند و باعث افت استحکام در این ناحیه می‌شوند. از آنجاییکه در زمان‌های بیشتر انجماد همدمما بهتر صورت می‌گیرد شاهد استحکام بیشتری هستیم.



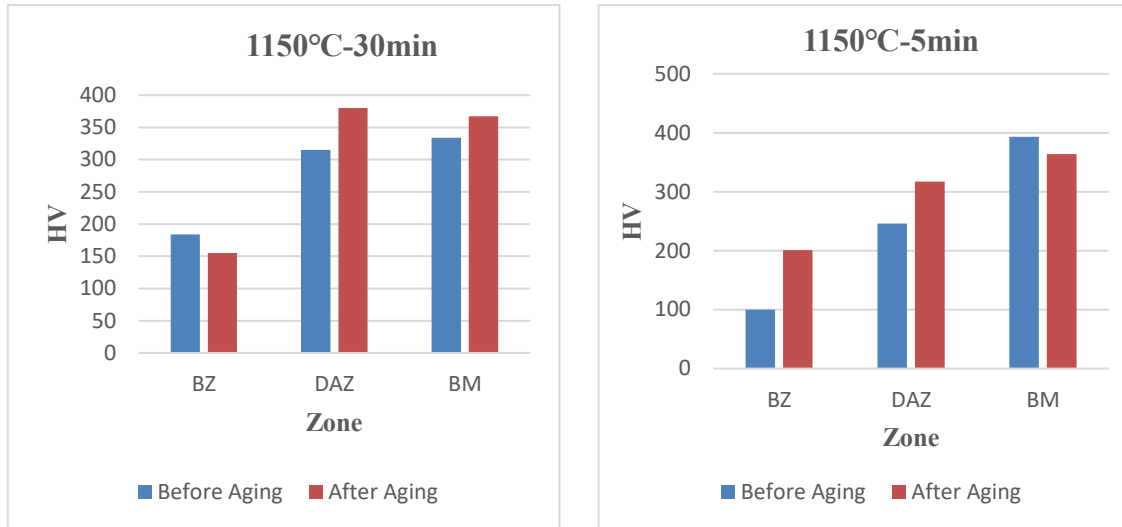
شکل (۷). استحکام کششی دو نمونه اتصال TLP فولاد 15-5PH در دمای ۱۱۵۰°C: (الف) زمان ۵ min ، (ب) زمان ۳۰ min.

۳-۴-۲- ریزسختی

ارزیابی پروفیل سختی از مقطع اتصال در نمونه پیرسازی شده در شکل ۸ نشان داده شده است. همانگونه که از قسمت‌های مختلف این شکل برداشت می‌شود با اعمال عملیات حرارتی بعد از اتصال دهی TLP و ریزشدن تیغه‌های مارتنزیتی، سختی ناحیه اتصال کاهش یافته و به سختی فلز پایه نزدیک شده است. همچنین با توجه به شکل ۹ با دور شدن از محل اتصال سختی بیشتر می‌شود و شاهد عمق اثر کمتری هستیم [۱۲].



شکل (۸). تصویر اندازه اثر حاصل از ایندنتور سختی‌سنجی در نمونه اتصال دهی شده در دمای ۱۱۵۰°C و زمان ۳۰ min.



شکل (۹). ریزسختی نواحی مختلف اتصال، قبل از پیرسازی و بعد از پیرسازی در دو زمان متفاوت.

۵- نتیجه گیری

- بررسی‌های ریزساختاری فرآیند اتصال دهی فولاد 15-5PH با فرآیند اتصال دهی فاز مایع گذرا (TLP) و لایه واسط BNi-3 در دمای ۱۱۵۰°C و زمان‌های ۵min و ۳۰min منجر به نتایج زیر گردید:
۱. افزایش زمان اتصال از ۵min به ۳۰min باعث نفوذ بهتر عناصر از فلز پایه به مرکز اتصال و همچنین از مرکز اتصال به فلز پایه می‌شود.
 ۲. با انجام عملیات حرارتی پیرسازی، فاز رسوب سختی مس در زمینه مارتنزیتی ایجاد می‌شود که عامل اصلی استحکام در فولاد 15-5PH می‌باشد.
 ۳. عملیات پیرسازی بعد از انجام اتصال دهی موجب ریزش تپه‌های درشت مارتنزیت می‌شود و با اینکار ریزساختار به حالت اولیه فلز پایه نزدیک تر می‌شود.
 ۴. با افزایش زمان اتصال به ۳۰min، سختی محل اتصال به دلیل کامل شدن انجماد همدم و کاهش مناطق انجماد غیرهمدم افزایش می‌یابد.
 ۵. استحکام برشی اتصال ایجاد شده در زمان اتصال بالا بیشتر از استحکام برشی در زمان ۵min است، زیرا مناطق انجماد غیرهمدم که باعث سهولت شکست در نمونه‌ها می‌شدند وجود ندارند.

۶- منابع

- [1]. Weinberger, T., Enzinger, N., & Cerjak, H. (2009). Microstructural and mechanical characterisation of friction stir welded 15-5PH steel. *Science and technology of welding and joining*, 14(3), 210-215.
- [2]. Ahmad, M., Casey, M., & Sürken, N. (2009). Experimental assessment of droplet impact erosion resistance of steam turbine blade materials. *Wear*, 267(9-10), 1605-1618.
- [3]. Herny, E., Lours, P., Cloue, J. M., Lagain, P., Perusin, S., Jourdain, E., & Andrieu, E. (2008). Local Mechanical and Microstructural characterization of electron beam welded 15-5PH stainless steel.

- [4]. Liu, W., Ma, J., Atabaki, M. M., Pillai, R., Kumar, B., Vasudevan, U., ... & Kovacevic, R. (2015). Hybrid laser-arc welding of 17-4 PH martensitic stainless steel. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, 2(2), 74-90.
- [5]. Jafari, M., Rafiei, M., & Mostaan, H. (2020). Effect of Temperature and Time on the Joint Properties of AISI420 Steel to SAF2507 Steel Produced by Transient Liquid Phase Process. *Journal of Advanced Materials in Engineering (Esteghlal)*, 39(2), 65-80.
- [6]. Misaghi, M. A., & Bakhtiari, R. (2017). Effect of temperature and time, the interlayer on microstructure and mechanical properties of Transient Liquid Phase (TLP) bonding of AISI321 stainless steel. *journal of New Materials*, 7(28), 95-112.
- [7]. Sun, Q. Q., & Lu, S. (2016). Elements diffusion and mechanical properties of 15-5PH stainless steel joint brazed with BNi-2 filler metal. In *Materials Science Forum* (Vol. 850, pp. 700-705). Trans Tech Publications Ltd.
- [8]. Elyasi, M., Soleimanimehr, H., Maghsoudpour, A., & Akhavan Farid, A. (2022). The effect of H900 and H1150 heat treatment on the machinability of 15-5 PH stainless steel. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, 8(12), 11-20.
- [9]. Jafari, M., Rafiei, M., & Mostaan, H. (2020). Effect of Temperature and Time on the Joint Properties of AISI420 Steel to SAF2507 Steel Produced by Transient Liquid Phase Process. *Journal of Advanced Materials in Engineering (Esteghlal)*, 39(2), 65-80.
- [10]. Bajguirani, H. H. (2002). The effect of ageing upon the microstructure and mechanical properties of type 15-5 PH stainless steel. *Materials Science and Engineering: A*, 338(1-2), 142-159.
- [11]. Te, R., & Zhang, Y. (2021). Strength-Toughness Improvement of 15-5PH Stainless Steel by Double Aging Treatment. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 1-10.
- [12]. Lippold, J. C., & Kotecki, D. J. (2005). *Welding metallurgy and weldability of stainless steels* (p. 376)