

بررسی تأثیر مقدار جریان و فرکانس در فرآیند PC-GTAW بر تحولات ریزساختاری اتصال جوشکاری سوپر آلیاژ Hastelloy B-2

مهدی خلاصی دزفولی^۱، مهدی قبیتی حسب^۲، علی حیدری مقدم^{۲*}
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۹/۱۰، ش.ص: ۱۸-۱، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۱۱)

چکیده

در این پژوهش ریزساختار اتصال سوپر آلیاژ پایه نیکل-مولیبدن Hastelloy B-2 با هدف بررسی اثر مقدار جریان و فرکانس بر تحولات ریزساختاری نواحی جوش داده شده مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، از فرآیند PC-GTAW و فلز پرکننده ERNiCrMo-2 استفاده گردید. با ثابت نگه داشتن دیگر پارامترهای این فرآیند، مقدار فرکانس در سه مقدار ۱۰، ۳۰ و ۵۰ هرتز و تغییرات جریان پالسی به صورت ۲۰:۸۰ و ۴۰:۶۰ تغییر داده شد. پس از جوشکاری تأثیر جریان و فرکانس بر روی ریزساختار فلز جوش توسط میکروسکوپ نوری (OM) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، همچنین به منظور آنالیز رسوبات تشکیل شده از آنالیز (EDS) استفاده شد. نتایج نشان داد، کاهش جریان بیشینه، منجر به کاهش حرارت ورودی به قطعه کار، در نتیجه منجر به کاهش شدید اندازه دندریتها در فلز جوش، کاهش اندازه دانه‌های منطقه متأثر از حرارت (HAZ) و کاهش قابل توجه مقدار کاربیده‌های مولیبدن در مناطق بین دندریتی در فلز جوش شده است. همچنین افزایش فرکانس، منجر به افزایش عرض و عمق جوش می‌شود. زمانی که فرکانس افزایش می‌یابد، هم‌پوشانی پالس‌ها افزایش یافته و حرارت در فاصله زمانی کمتری به حوضچه مذاب وارد می‌شود و ابعاد جوش افزایش می‌یابد. مطالعات ریزساختاری نشان داد که افزایش فرکانس، منجر به افزایش دندریتها در فلز جوش و افزایش وسعت منطقه متأثر از حرارت می‌شود.

واژه‌های کلیدی: Hastelloy B-2، PC-GTAW، مقدار جریان، مقدار فرکانس، ریزساختار، فلز جوش.

^۱ - کارشناس ارشد مهندسی مواد، مرکز تحقیقات مواد و انرژی، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران.

^۲ - استادیار، گروه مهندسی مواد، مرکز تحقیقات مواد و انرژی، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران.

* - نویسنده مسئول مقاله: alheidarym@yahoo.com

پیشگفتار

آلیاژهای پایه نیکلی از مهم‌ترین دسته‌های مواد مهندسی هستند؛ زیرا می‌توانند در گسترده وسیعی از محیط‌ها و کاربردها استفاده شوند. این آلیاژها برای مقاومت به خوردگی در هر دو نوع محیط دمای بالا و آبی، استحکام بالا در هر دو دمای محیط و بالا، انعطاف پذیری و چقرمگی در دماهای پایین، خواص الکتریکی خاص و برای بسیاری دیگر از کاربردهای وابسته به خواص فیزیکی انتخاب می‌شوند. مواد مصرفی جهت جوشکاری آلیاژ پایه نیکل در شرایط پس از جوشکاری خواصی ارایه می‌دهند که در هیچ نوع دیگری از محصولات جوشکاری چنین خواصی یافت نمی‌شود، مانند قابلیت رقیق شدن توسط تعدادی از عناصر آلیاژی گوناگون در حالی که استحکام و انعطاف پذیری را از دماهای برودتی تا دماهای نزدیک به خط سالیدوس حفظ می‌کنند. در مقایسه با فولادها، آلیاژهای پایه نیکل می‌توانند در هر دو دمای برودتی و دماهای نزدیک به 1200°C استفاده شوند؛ زیرا زمینه آلیاژهای محلول جامد از دمای انجماد تا صفر مطلق آستنیتی باقی می‌ماند. با افزودن عناصر آلیاژی مناسب این آلیاژها مقاومت به خوردگی خوبی ارائه کرده و در گستره وسیعی از صنایع شامل تولید نیرو، پتروشیمی، فراورش شیمیایی، هوافضا و کنترل آلودگی به کار می‌روند. بدین منظور جوشکاری یک روش ساخت مهم برای آلیاژهای پایه نیکل است. تحقیق و توسعه قابل توجهی در طی ۵۰ سال اخیر به منظور فهم بهتر و کنترل جوش پذیری این آلیاژها و توسعه مواد مصرفی فرآیندهای جوشکاری انجام شده است که همواره دارای روند روبه رشد مطالبات در زمینه‌های مقاومت به خوردگی و خواص مکانیکی اتصالات جوش داده شده بوده است [۴-۱]. پاندیت و همکاران [۵] طی پژوهشی به بررسی خواص اتصال در جوشکاری غیرمشابه سوپر آلیاژهای مونل ۴۰۰ و Hastelloy C-276 پرداختند. نتایج آزمون کشش نشان داد، شکست در فلزات پایه و به صورت نرم رخ می‌دهد. همچنین نتایج آنالیز عنصری (EDS) حاکی از تشکیل ترکیبات بین فلزی در فلز جوش و HAZ بود که وجود این ترکیبات افزایش استحکام و مقاومت در برابر ضربه را در پی داشت. وو و همکاران [۶] سوپر آلیاژ Hastelloy C-276 را با روش لیزر پالسی جوشکاری کردند. نتایج نشان داد که این روش باعث ریزدانگی فلزات جوش و HAZ می‌شود. مانیکاندان و همکاران [۷] به ارزیابی ریزساختار و خواص مکانیکی

اتصالات آلیاژ Hastelloy C-276 جوشکاری شده به روش تیگ پالسی پرداختند. نتایج نشان داد، اعمال جریان جوشکاری به صورت پالسی علاوه بر کم کردن عرض منطقه HAZ، باعث ریزدانگی فلز جوش و کاهش ریزجدایش‌ها در مناطق بین دندریتی می‌گردد. نجف زادگان و همکاران [۸] خواص مکانیکی ناحیه جوش آلیاژ Hastelloy-X جوشکاری شده به روش لیزر پالسی را مورد بررسی قرار دادند. جوشکاری بدون استفاده از فلز پرکننده و به صورت هدایتی انجام شد. نتایج آزمون ریز سختی، بالا بودن سختی فلز جوش نسبت به فلز پایه را نشان داد که ناشی از کاهش اندازه دانه فلز جوش نسبت به فلز پایه و نیز بالا بودن سرعت سرد شدن ناحیه جوش در جوشکاری لیزر است. وانگ و همکاران [۹] طی پژوهشی به بررسی تاثیر عملیات حرارتی PWHT بر روی ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ Hastelloy-N به روش تیگ پالسی پرداختند. نتایج نشان داد، نمونه‌های جوش داده شده بیش‌ترین سختی نسبت به نمونه‌های پس از PWHT را دارا بوده، همچنین استحکام تسلیم در نمونه‌های جوش داده شده نسبت به نمونه‌های جوش بعد از PWHT دارای بیش‌ترین مقدار و درصد ازدیاد طول در نمونه‌های جوش پس از PWHT دارای بیش‌ترین مقدار نسبت به نمونه‌های جوش گزارش شد. همچنین نتایج نشان داد که کاربیدهای M_6C یونکتیک و کاربیدهای M_6C با اندازه نانومتری در منطقه بین دندریتی نمونه‌های جوش مشاهده شد. با افزایش دمای PWHT، کاربیدهای M_6C با اندازه نانومتری حل شده، در صورتی که کاربیدهای M_6C در مرزهای بین دندریتی درشت شدند.

باتوجه به مطالب ارائه شده در این بخش، مشخص است که جوشکاری سوپر آلیاژهای پایه نیکل از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. از سوی دیگر، در تحقیقات گذشته تاثیر مقدار جریان و فرکانس در فرآیند PC-GTAW بر تحولات ریزساختاری اتصال جوشکاری سوپر آلیاژ Hastelloy B-2 مورد بررسی قرار نگرفته است. لذا در این پژوهش به این موضوع پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش از ورق‌هایی به ضخامت ۱ میلی‌متر از جنس سوپر آلیاژ Hastelloy B-2 در شرایط آنیل انحلالی، ساخت شرکت M.M.C OKEGAWA کره جنوبی به عنوان

عمود بر جهت نورد فلزات پایه باشد. با توجه به ضخامت کم ورق‌ها هیچ گونه پخی روی آن‌ها ایجاد نشد، لذا طرح اتصال مطابق شکل (۱) بر اساس استاندارد AWS D1.1 به صورت لب به لب ساده بدن فاصله انتخاب شد.

پس از آماده‌سازی نمونه‌ها به منظور حذف هرگونه لایه اکسیدی و آلودگی سطحی، محل اتصال توسط برس سیمی تمیز و با استون چربی زدایی و خشک شد. پس از آماده سازی نمونه‌ها به منظور جلوگیری از تاب برداشتن و همچنین ایجاد گاز پشت بند جهت محافظت از ریشه جوش، از یک صفحه فلزی به ابعاد 450×450 میلیمتر به ضخامت ۱۰ میلیمتر و با ایجاد یک شیار سرتاسری به عرض ۸ میلیمتر استفاده شد تا گاز را به ریشه جوش برساند. جهت انجام فرآیند اتصال، از روش تیگ پالسی با گاز محافظ آرگون، قطبیت DCEN و استفاده از فلز پرکننده ERNiCrMo-2 در یک پاس انجام گردید. جهت جوشکاری از الکتروود تنگستنی مصرف نشدنی حاوی ۲٪ توریوم به قطر $2/4$ میلیمتر، گاز محافظ آرگون با خلوص $99/999\%$ و دبی ۱۵ لیتر بر دقیقه استفاده شد.

فلز پایه استفاده گردید. انتخاب فلز پایه مورد اشاره به دلیل اهمیت و کاربرد وسیع آن در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی بوده است. به همین منظور جهت اتصال فلز پایه از سیم جوش ERNiCrMo-2 (Hastelloy-x) به عنوان فلز پرکننده، به قطر $1/6$ میلیمتر استفاده شد. جهت تعیین دقیق ترکیب شیمیایی فلز پایه و فلز پرکننده از آنالیز طیف سنج نشر اتمی (کوانتومتری) استفاده شد که نتایج آن در جدول (۱) نشان داده شده است. انتخاب فلز پرکننده در این پژوهش علاوه بر ترکیب شیمیایی بر اساس پارامترهای دیگر مانند خواص مکانیکی، مقاومت به خوردگی و در دسترس بودن انجام شد. بر همین اساس از استاندارد AWS A5.14 برای انتخاب فلز پرکننده استفاده شد.

به منظور آماده‌سازی فلزات پایه جهت انجام فرآیند اتصال، ابتدا نمونه‌هایی در ابعاد $150 \times 150 \times 1$ میلی‌متر توسط گیوتین برش داده شدند. سپس به منظور دستیابی به طرح اتصال مورد نظر، لبه نمونه‌ها در جهت طول، با سوهان کاری صاف و آماده گردید. لازم به ذکر است که آماده‌سازی نمونه‌ها به گونه‌ای انجام گرفت که خط جوش

جدول ۱- ترکیب شیمیایی فلز پایه و فلز پرکننده (%wt)

%Wt	C	Al	Si	Mn	Nb	Cu	Cr	Ni	Mo	V	Fe
hastalloy B-2(base)	۰/۱۲۲	۰/۱۴۵	۰/۳۲۳	۰/۷۲۲	۰/۳۰۷	۰/۷۹۵	۰/۴۳۸	۶۹	۲۵/۲۸	۰/۴۰۳	۴
Hastalloy X	۰/۱۷۴	۰/۴۷۴	۰/۳۱۸	۰/۶۵۴	۰/۱۸۱	۱/۱۸	۱۸/۷۴	۷۰	۶/۷۸	۰/۳۳۹	۲۴/۸۴



Butt Weld

شکل ۱- شماتیک طرح اتصال

استفاده شد. به منظور بررسی‌های فازی نمونه‌ها، آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD) با دستگاه پراش پرتو ایکس مارک ASENWARE مدل AW-XDM300 با شرایط آزمایشگاهی Step size: 0.05 deg و Step time: 1 sec مورد استفاده قرار گرفت و برای تحلیل نتایج از نرم افزار X'Pert استفاده شد.

نتایج و بحث

ریزساختار فلز پایه

سوپر آلیاژ Hastelloy B-2، جزو سوپر آلیاژهای پایه نیکل استحکام یافته محلول جامد می‌باشد که مانند سایر آلیاژهای این گروه به صورت آستنیتی منجمد شده و در پایان انجماد نیز کاملاً آستنیتی خواهد بود. این آستنیت در طول سرد شدن در محدوده دمایی انجماد پایدار است و ریزساختار دمای اتاق کاملاً آستنیتی است. این فاز توسط عناصر کبالت، آهن، کروم، مولیبدن، تیتانیوم و آلومینیوم استحکام می‌یابد. این عناصر بین ۱ تا ۱۳ درصد در قطر اتمی و ۱ تا ۷ درصد در عدد جاهای خالی الکترونی (Nv)، با نیکل اختلاف دارند. بزرگ‌تر بودن قطر اتمی عناصر حلال نسبت به نیکل و همچنین موقعیت آن‌ها در جدول تناوبی عناصر، سبب افزایش استحکام زمینه آستنیت می‌شود. با حل شدن عنصر مولیبدن که اختلاف اندازه اتمی زیادی با فاز زمینه دارد، افزایش استحکام با شیب بیشتری صورت می‌گیرد. در این آلیاژ عناصر کروم، آهن و مولیبدن معمولاً به عنوان استحکام دهنده محلول جامد استفاده می‌شوند. کروم، سبب افزایش مقاومت به خوردگی داغ و اکسایش می‌گردد و همچنین به عنوان یک عنصر کاربیدزا، استحکام ماده را در دمای بالا افزایش می‌دهد. علاوه بر این‌ها این عنصر می‌تواند با تشکیل محلول جامد استحکام زمینه را افزایش دهد.

جوشکاری نمونه‌ها با استفاده از دستگاه اینورتر جوش آرگون مدل P200TIG ساخت شرکت ایران ترانس به صورت دستی انجام شد. در فرآیند جوشکاری PC-GTAW، جریان بیشینه، جریان زمینه، فرکانس و درصد زمان روشن بودن پارامترهای اصلی فرآیند می‌باشند، لذا به منظور محاسبه حرارت ورودی از رابطه زیر استفاده گردید [۱۰].

$$H. I = \eta * \frac{I * V * 60}{S * 1000}$$

در این رابطه H حرارت ورودی، I شدت جریان، V ولتاژ و S سرعت جوشکاری است. η بازده قوس در این رابطه ۰/۷ در نظر گرفته شده است. با توجه به سیالیت حوضچه مذاب و سرعت دست جوشکار و مطالعه منابع مقدار پارامترهای جریان بیشینه، جریان زمینه و فرکانس تغییر داده شدند، تا اثرات آن‌ها بر روی ریزساختار اتصالات مورد بررسی قرارگیرد. جدول ۲ مشخصات جوشکاری نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

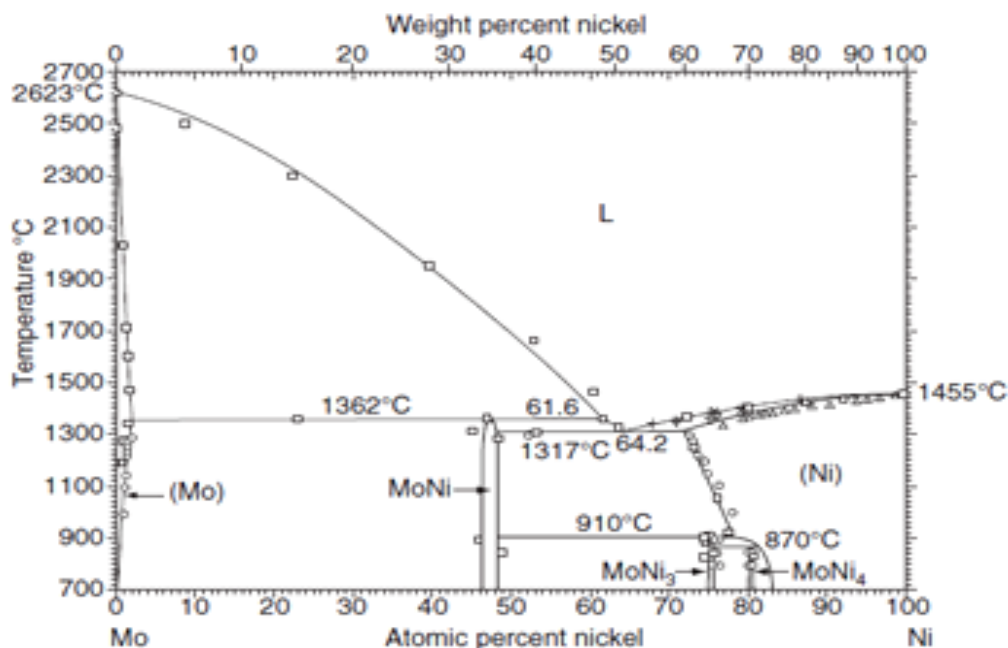
برای مطالعه و بررسی ریزساختار فلز پایه، منطقه جوش و منطقه متأثر از حرارت، نمونه‌هایی از مقطع عرضی جوش مطابق با استاندارد ASTM E3-11 جهت آماده سازی و متالوگرافی تهیه شده و پس از انجام عملیات پرداخت، سطح نمونه توسط محلول اسید اگزالیک ۱۰٪ به مدت ۱۵ ثانیه اچ شده سپس ریزساختار فلز پایه، منطقه جوش و منطقه متأثر از حرارت با استفاده از میکروسکوپ نوری مارک Optika مدل B-600 و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مارک TESCAN مدل VEGA مورد مطالعه قرار گرفت. ابتدا بررسی‌های ریزساختاری به وسیله میکروسکوپ نوری و نهایتاً جهت بررسی دقیق‌تر ریزساختار و شناسایی فازها و نواحی مختلف جوش از میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به آنالیز طیف سنجی تفکیک انرژی (EDS)

جدول ۲- پارامترهای جوشکار به کار رفته در فرآیند PC-GTAW

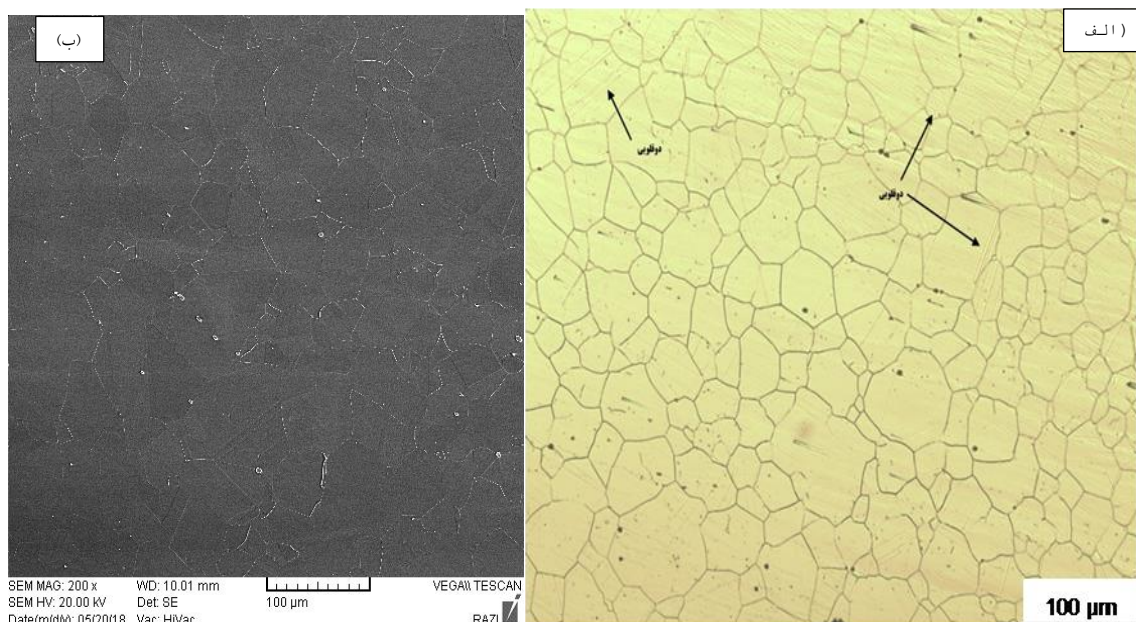
درصد زمان روشن بودن	فرکانس (HZ)	جریان زمینه (A)	جریان بیشینه (A)
۵۰	۱۰	۲۰	۸۰
۵۰	۱۰	۴۰	۶۰
۵۰	۳۰	۴۰	۶۰
۵۰	۵۰	۴۰	۶۰

تصویر میکروسکوپ نوری و الکترونی از ریزساختار سوپر آلیاژ Hastelloy B-2 مورد استفاده در این پژوهش در شکل (۳) نشان داده شده است. مطابق انتظار و با توجه به تحقیقات پیشین [۳]، ریزساختار این آلیاژ شامل دانه‌های هم‌محور آستنیت به همراه رسوبات ریز است که درون دانه‌ها و در مرز دانه‌ها پراکنده شده‌اند. اندازه متوسط دانه‌ها در حدود ۴۰ میکرون است که این نوع دانه‌بندی را می‌توان نتیجه فرآیند آنیل انحلالی انجام شده بر روی آلیاژ دانست. با انجام عملیات آنیل انحلالی علاوه بر یکنواختی در ترکیب شیمیایی در اثر وقوع پدیده تبلور مجدد، ساختاری با دانه‌های هم‌محور ایجاد می‌شود. در ریزساختار فلز پایه، دوقلوبی‌های آنیلی نیز مشاهده می‌شوند. این دوقلوبها هنگامی تشکیل می‌شوند که در ضمن تبلور مجدد و رشد دانه‌ها، در چینش اتم‌ها و استقرار آن‌ها بر روی صفحات فشرده (۱۱۱) تغییراتی رخ دهد [۱۲]. به دلیل جلوگیری از حرکت نابجایی‌ها توسط این دوقلوبی‌ها استحکام ماده تا حدودی افزایش می‌یابد. در ریزساختار، دوقلوبها توسط نوارهایی مستقیم با وجوه موازی مشخص می‌شوند (شکل ۳ الف).

کربن به عنوان عنصر اصلی تشکیل دهنده کاربیدها نقش بسزایی در استحکام بخشی کششی و خزشی این آلیاژ بازی می‌کند و افزایش این عنصر، سبب کاهش مقاومت به خوردگی و اکسایش می‌گردد. مولیبدن نیز می‌تواند در طی سرویس در دمای بالا به مدت زمان طولانی از طریق واکنش‌های رسوبی حالت جامد و همچنین در پایان انجماد از طریق واکنش‌های نوع یوتکتیکی رسوب کند. مولیبدن به علت نفوذ پذیری کم در نیکل برای افزایش استحکام خزشی مفید است. بر مبنای آنچه در جدول (۱) آورده شده است، میزان نیکل و مولیبدن آلیاژ Hastelloy B-2، به ترتیب ۶۹ و ۲۵ درصد وزنی می‌باشد، لذا سیستم Ni-Mo مبنای این آلیاژ است. همان‌گونه که به وسیله نمودار فازی Ni-Mo در شکل (۲) نشان داده شده است، نیکل می‌تواند در دمای یوتکتیک ۲۸ درصد وزنی مولیبدن را در خود حل کند. سه ترکیب بین فلزی منظم وجود دارند که در نسبت استوکیومتری ترکیبات Ni_4Mo (β), Ni_3Mo (δ), $NiMo$ (γ) می‌توانند در دماهای پایین‌تر تشکیل و موجب تردی شوند [۱۰ و ۱۱]. در اثر گرمایش، فازهای β و γ طی واکنش پری‌تکتوئید و δ در اثر واکنش پری‌تکتیکی تجزیه می‌شوند. در ترکیب حاوی ۳۵٪ Mo و دمای ۱۳۱۸ درجه سانتی‌گراد واکنش یوتکتیک رخ می‌دهد که در آن فازهای δ و α از فاز مذاب به وجود می‌آیند [۳].



شکل ۲- دیاگرام فازی Ni-Mo [۳]

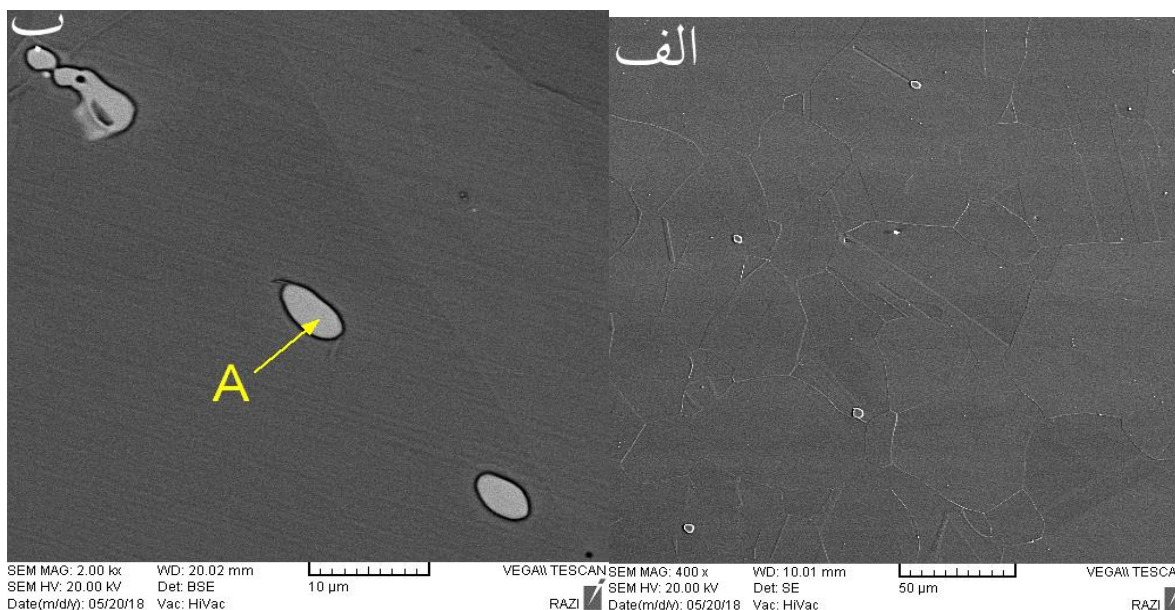


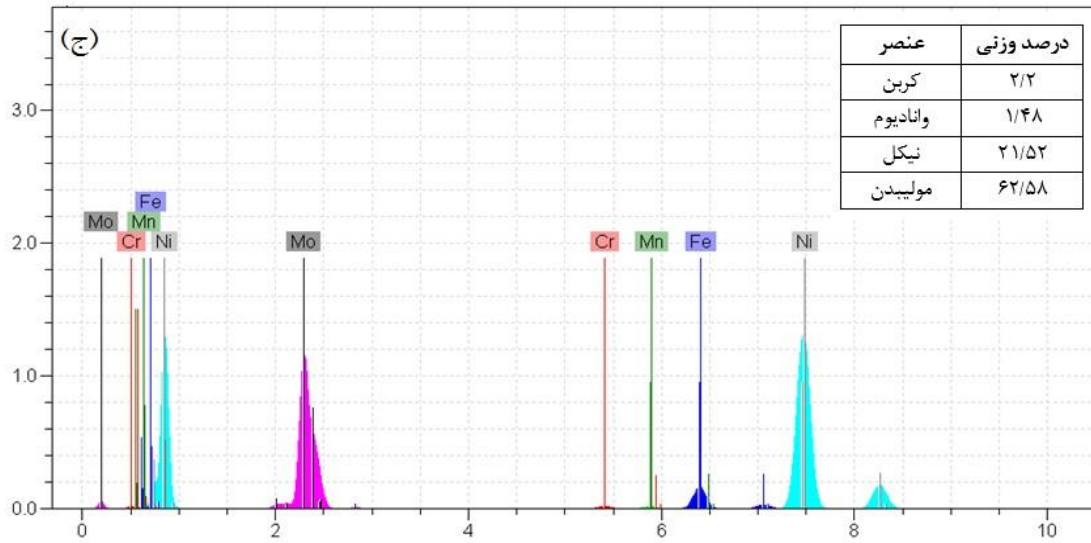
شکل ۳- ریزساختار فلز پایه الف) تصویر میکروسکوپ نوری ب) تصویر میکروسکوپ الکترونی

می‌باشند که بیش‌ترین شدت را داشته و مربوط به فاز آستنیت هستند. همچنین پیک‌های رسوبات Ni_3Mo و Ni_4Mo در زوایای $73/997$ و $96/004$ به ترتیب مربوط به صفحات (203) ، (422) هستند. در این خصوص نتایج مشابهی توسط دیگر محققان نیز ارائه شده است [۱۳]. از این رو بررسی نتایج الگوی پراش اشعه ایکس، حاکی از آن است که فاز γ به‌عنوان فاز رسوبی ارجح نسبت به فازهای β و δ بوده و بیش‌ترین رسوبات در زمینه فلز پایه مربوط به فاز γ است.

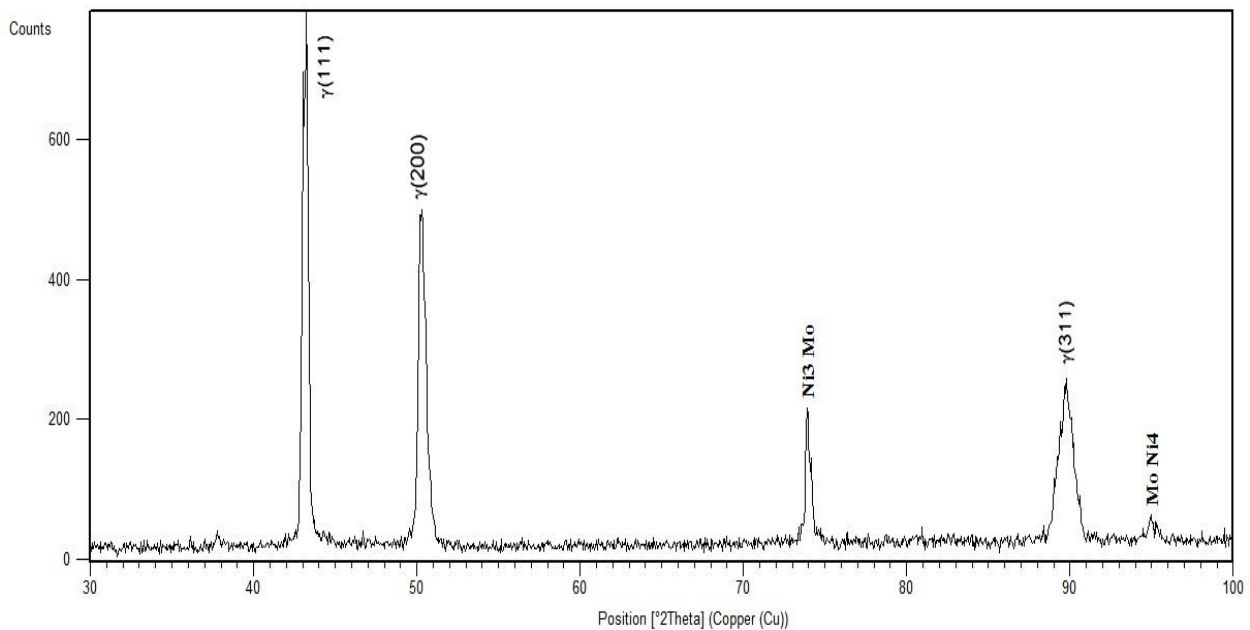
با استفاده از آنالیز EDS ذرات توزیع شده در زمینه فلز پایه مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد، رسوباتی غنی از عناصر نیکل و مولیبدن درون دانه و غالباً در مرز دانه‌ها توزیع شده‌اند (شکل ۴).

به منظور شناسایی فازها و رسوبات موجود در سوپر آلیاژ Hastelloy B-2 از الگوی پراش اشعه ایکس (XRD) نیز استفاده شد که نتایج آن در شکل (۵) آورده شده است. همان‌گونه که از الگوی پراش پیداست، پیک‌های ظاهر شده در زوایای 2θ به ترتیب $43/416$ ، $50/1620$ و $90/4312$ که مربوط به صفحات (111) ، (200) و (311) فاز γ





شکل ۴- الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی از پراکندگی رسوبات در فلز پایه، ب) شناسایی رسوبات به طول حدوداً ۸ میکرومتر در فلز پایه، ج) آنالیز عنصری (EDS) از رسوب A در فلز پایه



شکل ۵- الگوی پراش اشعه ایکس فلز پایه سوپر آلیاژ Hastelloy B-2

ریز ساختار فلز جوش

ریز ساختار مرزدانه‌ها در فلز جوش

از آن جایی که بسیاری از عیوب مربوط به منطقه ذوب طی مرحله تولید و سرویس در رابطه با مرزها هستند، شناخت طبیعت مرزهای مختلف یا فصل مشترک‌ها که در

فلز جوش پایه نیکل موجودند، مهم می‌باشد. به دلیل آن که ساختار انجمادی آستنیتی پس از پولیش و اچ کردن به وضوح آشکار می‌گردد، مرزها در فلزات جوش آلیاژهای پایه نیکل به خوبی قابل مشاهده هستند [۱]. در شکل (۶) در

هستند که در برخی منابع از آن به عنوان ترک خوردگی ناشی از افت انعطاف‌پذیری^۵ در آلیاژی با ریزساختار کاملاً آستنیتی، یاد شده است. این نوع ترک خوردگی که می‌توان آن را نوعی از ترک خوردگی گرم به حساب آورد، با افت شدید انعطاف‌پذیری در دماهای بالاتر از تقریباً نصف نقطه ذوب ماده مرتبط است [۱۴ و ۱۵].

تأثیر شدت جریان بر ریزساختار فلز جوش

نتایج نشان می‌دهد که شدت جریان بر اندازه دانه فلز جوش مؤثر است، شکل (۸) تغییرات اندازه دانه در نمونه‌های مورد استفاده بر حسب تغییرات جریان را نشان می‌دهد. از سویی تأثیر شدت جریان و تأثیر آن بر ریزساختار در شکل (۹) نشان داده شده است. با افزایش جریان بیشینه، اندازه دانه‌ها در مناطق مختلف فلز جوش افزایش یافته است. در زمان اعمال شدت جریان بیشینه، حرارت ورودی بیشتری به قطعه اعمال می‌شود. زمانی که حد جریان به مقدار زمینه خود می‌رسد، زمان سرد شدن قطعه طولانی‌تر شده و دانه‌ها اجازه رشد بیشتری می‌یابند. در این جوشکاری هرگاه سایر پارامترهای جوشکاری از جمله سرعت جوشکاری و ولتاژ برای همه نمونه‌ها ثابت باشد، با کاهش شدت جریان، حرارت ورودی به قطعه کاهش می‌یابد. بنابراین کاهش شدت جریان و کاهش حرارت ورودی باعث می‌شود که دانه‌ها در حین انجماد کم‌تر اجازه رشد پیدا کنند و ساختار نهایی جوش ناشی از انجماد در منطقه جوش به سمت ریز شدن دندریته‌ها رود. به منظور بررسی دقیق‌تر تأثیر شدت جریان بیشینه و زمینه بر اندازه دندریته‌های فلز جوش از نرم افزار Image J استفاده شد. نتایج نشان داد میانگین طول دندریته‌ها از ۲۵/۳۳ میکرومتر در حالت جریان بیشینه ۸۰ آمپر و جریان زمینه ۲۰ آمپر به ۱۵/۱۲ میکرومتر در حالت جریان بیشینه ۶۰ آمپر و جریان زمینه ۴۰ آمپر کاهش یافته است که این امر مؤید یافته‌های تئوری در این زمینه می‌باشد.

فلز جوش ERNiCrMo-2 مرز دانه‌های انجماد^۱ که از تقاطع بسته‌ها یا گروه‌های دانه‌های فرعی ایجاد می‌شوند، مشاهده می‌شوند. SGB ها نتیجه مستقیم رشد رقابتی هستند که طی انجماد در امتداد لبه پشتی^۲ حوضچه جوش اتفاق می‌افتد. به دلیل اینکه هر کدام از این بسته‌های دانه‌های فرعی دارای جهت رشد و جهت‌گیری متفاوتی هستند، تقاطع آن‌ها، منجر به مرزی با عدم انطباق زاویه بزرگ^۳ می‌شود. این مرزها معمولاً مرزهای با زاویه بزرگ نامیده می‌شوند. چنین عدم انطباقی منجر به توسعه یک شبکه نابجایی در طول SGB می‌شود. این ترکیبات ممکن است، باعث تشکیل لایه‌های نازک مذاب با نقطه ذوب پایین در طول SGB ها شده و نهایتاً موجب ایجاد ترک‌های انجمادی جوش شوند. ترک‌های انجمادی جوش در فلزات جوش آلیاژهای پایه نیکل اغلب در امتداد SGB ها رخ می‌دهد.

در شکل (۶-ب) مرز دانه‌های فرعی انجماد نیز مشاهده می‌شود. دانه‌های فرعی انجماد نشان دهنده ظریف‌ترین ساختاری است که می‌تواند با میکروسکوپ نوری تشخیص داده شود. این دانه‌های فرعی معمولاً به صورت سلول‌ها و یا دندریته‌ها موجود هستند و مرز جداکننده بین دانه‌های فرعی چسبیده به یکدیگر به عنوان مرزهای فرعی انجماد (SSGB) شناخته شده است. این مرزها در ریزساختار آشکار هستند؛ زیرا ترکیب شیمیایی آن‌ها از ریزساختار کلی متفاوت است. این مرزها از نظر کریستالوگرافی مرزهای با زاویه کم شناخته شده‌اند [۸]. شکل (۷) نشان می‌دهد که تا حدودی مهاجرت مرز دانه‌ها نیز در ساختار فلز جوش رخ داده است که نیروی محرکه لازم برای مهاجرت، مشابه رشد دانه در فلز پایه، در این مورد نیز کاهش انرژی مرز می‌باشد. مهاجرت مرز دانه‌ها بیش‌تر در حین گرم شدن مجدد از قبیل جوشکاری چند پاسه امکان‌پذیر است. مرز دانه‌های مهاجرت کرده^۴ با اختلاف زیاد از مرزهای اولیه شکل می‌گیرند و باعث کاهش انرژی سیستم می‌شوند. حضور ترک‌های میکروسکوپی در امتداد مرزهای مهاجرت کرده در شکل (۷) دیده می‌شود. این ترک‌ها مشابه آن چیزی

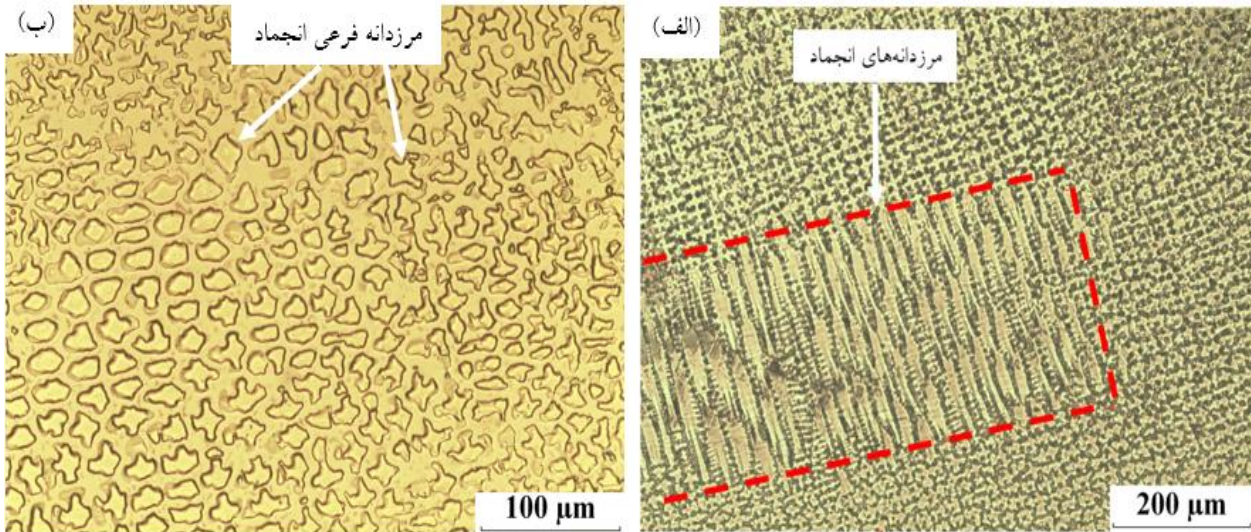
4- Migrated Grain Boundary

5- Ductility Dip Cracking (DDC)

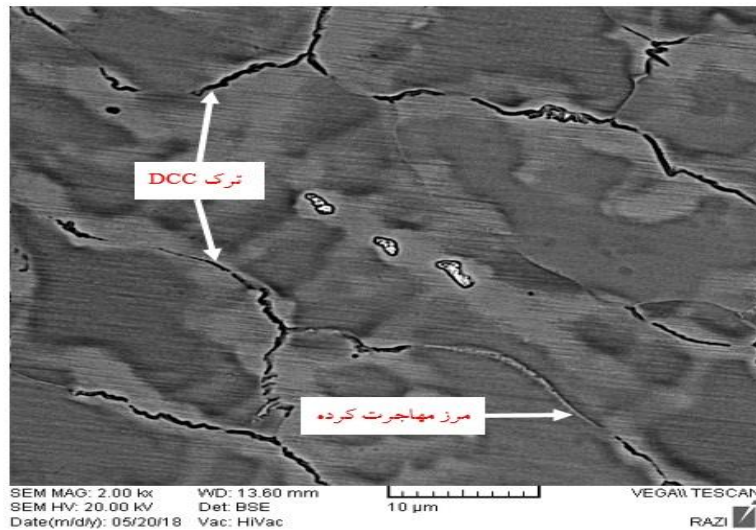
1-Solidification Grain Boundary (SGB)

2-Trailing Edge

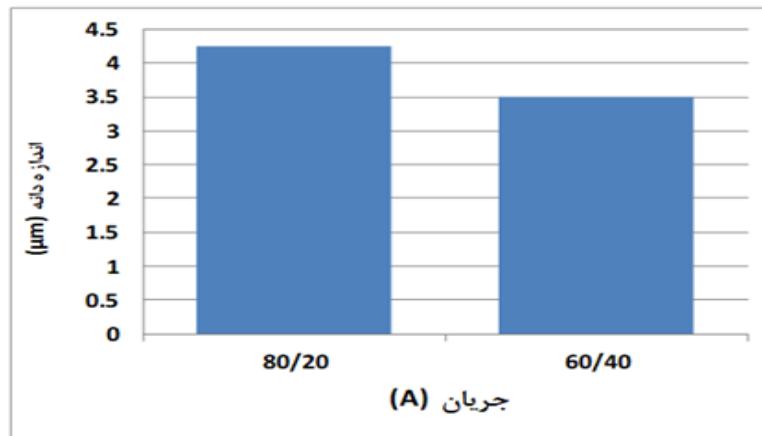
3-High-angle Grain Boundary



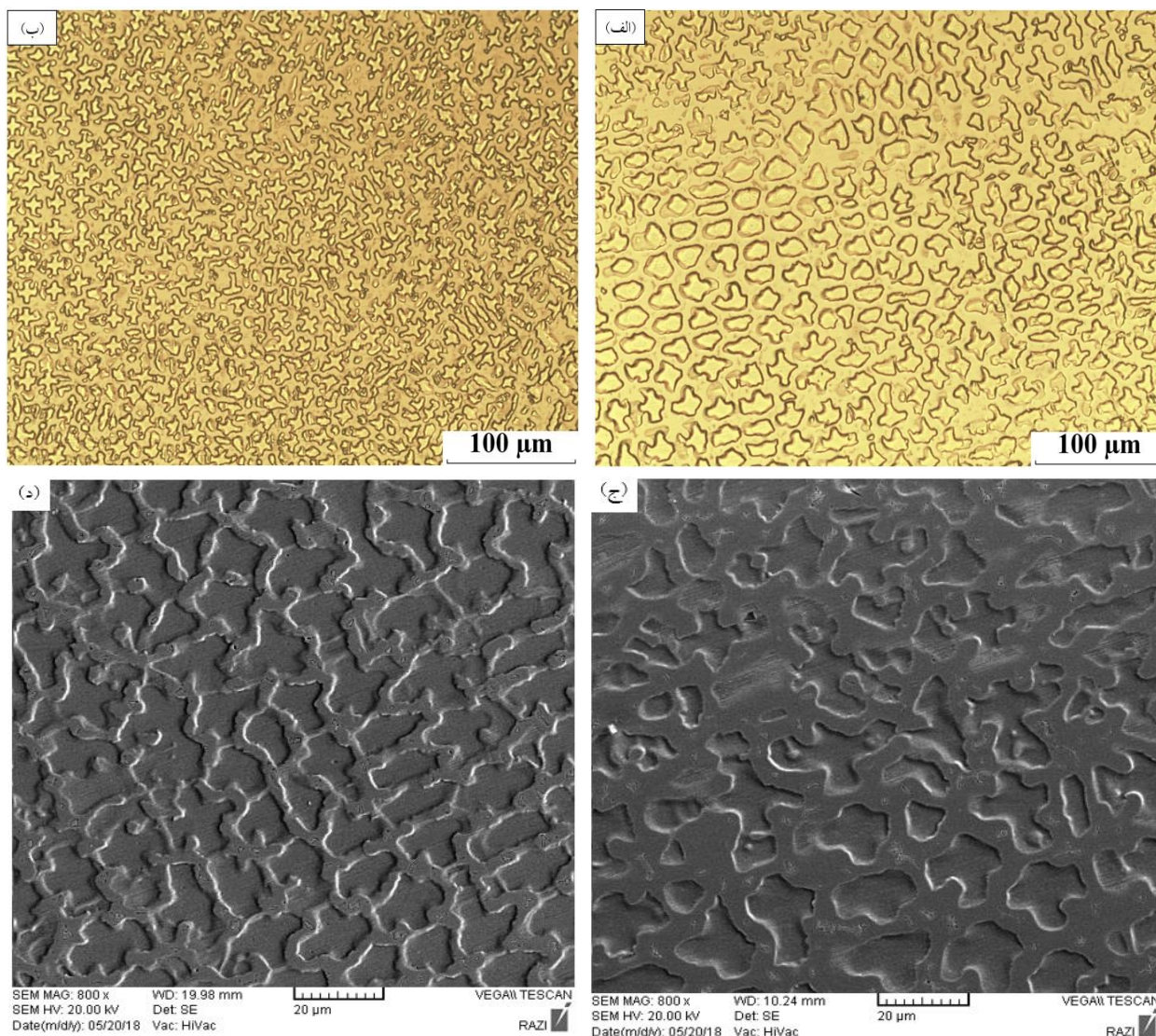
شکل ۶-الف) مرزدانه‌های انجماد در فلز جوش ERNiCrMo-2 با جریان پالسی. ب) مرزدانه‌های فرعی انجماد در فلز جوش ERNiCrMo-2 با جریان پالسی



شکل ۷- تصویر میکروسکوپ الکترونی ترک‌های DCC در امتداد مرزهای مهاجرت کرده را نشان می‌دهد



شکل ۸- تغییرات اندازه دانه بر حسب جریان



شکل ۹- تأثیر شدت جریان بیشینه بر ریزساختار فلز جوش ERNiCrMo-2. جریان بیشینه ۸۰ آمپر و جریان زمینه ۲۰ آمپر ((الف) نوری و (ج) الکترونی). جریان بیشینه ۶۰ آمپر و جریان زمینه ۴۰ آمپر ((ب) نوری و (د) الکترونی)، (برای هر دو حالت فرکانس ۳۰ و درصد زمان روشن بودن ۵۰ می‌باشد)

(شکل ۱۰). بر طبق محاسباتی که توسط کلایتون و همکاران انجام گرفته است [۱۵]، ضریب توزیع عناصر K برای نیکل، کروم و آهن، بزرگتر از یک می‌باشد $(k = C_s/C_0)$ ، ترکیب نامی آلیاژ و C_s غلظت نواحی بین دندریتی). عناصر آلیاژی که ضریب توزیع آنها کم‌تر از یک است، تمایل به جدایش در مذاب بین دندریتی و عناصر با ضریب توزیع بیش‌تر از یک در مرکز دندریتها جدایش می‌یابند، لذا عناصر نیکل، کروم و آهن درون دندریتها منجمد می‌شوند. همچنین مقدار ضریب توزیع عناصر برای عنصر مولیبدن کم‌تر از یک می‌باشد که این امر منجر به جدایش این عنصر به سمت فلز مذاب و در نتیجه غنی شدن نواحی بین دندریتی از این عنصر در مراحل پایانی انجماد

رفتار جدایش عناصر محلول می‌تواند به طور قابل توجهی از طریق سرعت رشد جبهه انجماد تحت تأثیر قرار بگیرد. تئوری‌هایی نیز برای مرتبط کردن درجه ریز جدایش عناصر محلول به سرعت رشد فازهای انجمادی، شکل گرفته است. در شرایط سرعت بالای سرد شدن که با کاهش جریان بیشینه و افزایش جریان زمینه اتفاق می‌افتد، میزان جدایش کاهش خواهد یافت. کاهش در میزان غنی شدن دندریتهای جامد و یا مذاب بین دندریتی از عناصر محلول، می‌تواند به تفاوت چشمگیری بین ریزساختار منجمد شده آلیاژ ریختگی و آن چیزی که در فلز جوش مشاهده می‌شود، منجر گردد؛ اما نتایج آنالیز عنصری نشانگر افزایش میزان مولیبدن در نواحی بین دندریتی در شکل می‌باشد

جوشکاری شده با مود جریان جوشکاری ۸۰:۲۰ و ۶۰:۴۰ آورده شده است. تفاوت اندازه دانه در HAZ به وضوح مشاهده می‌گردد. در روش جوشکاری پالسی با جریان بیشینه ۸۰ و زمینه ۲۰ اندکی درشت‌دانه‌گی در HAZ دیده می‌شود؛ اما همچنان که در دیگر پژوهش‌ها نیز گزارش شده است، در جوشکاری پالسی با جریان بیشینه ۶۰ و زمینه ۴۰ به دلیل کنترل حرارت ورودی و سرعت سرد شدن بیشتر نسبت به جوشکاری با جریان بیشینه ۸۰ و زمینه ۲۰، رشد دانه در HAZ اتفاق نمی‌افتد.

تأثیر فرکانس بر ریزساختار فلز جوش

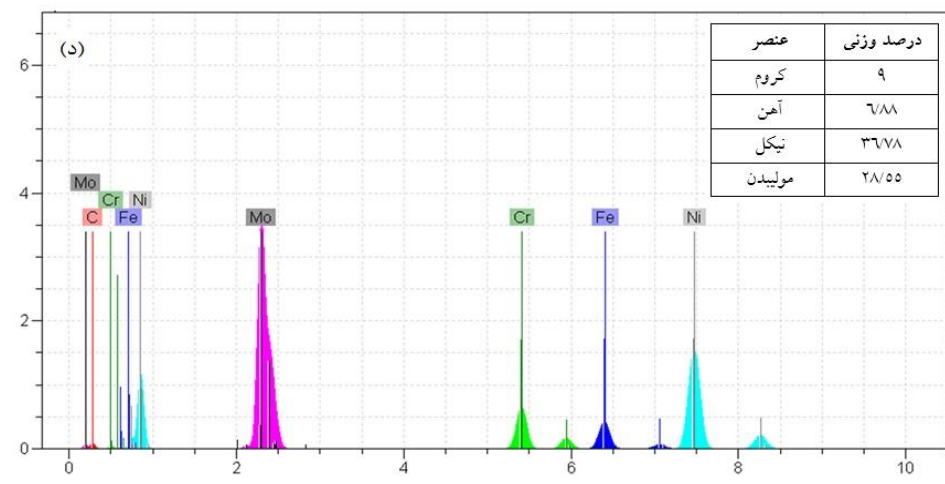
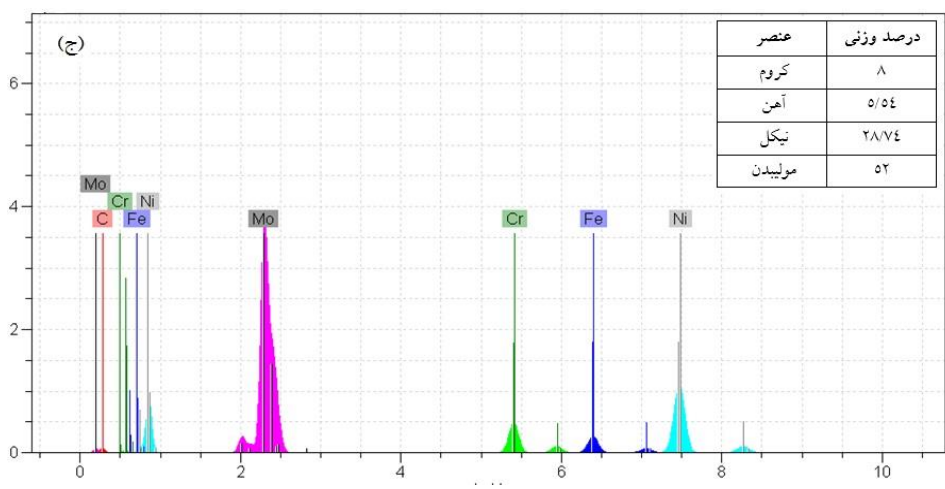
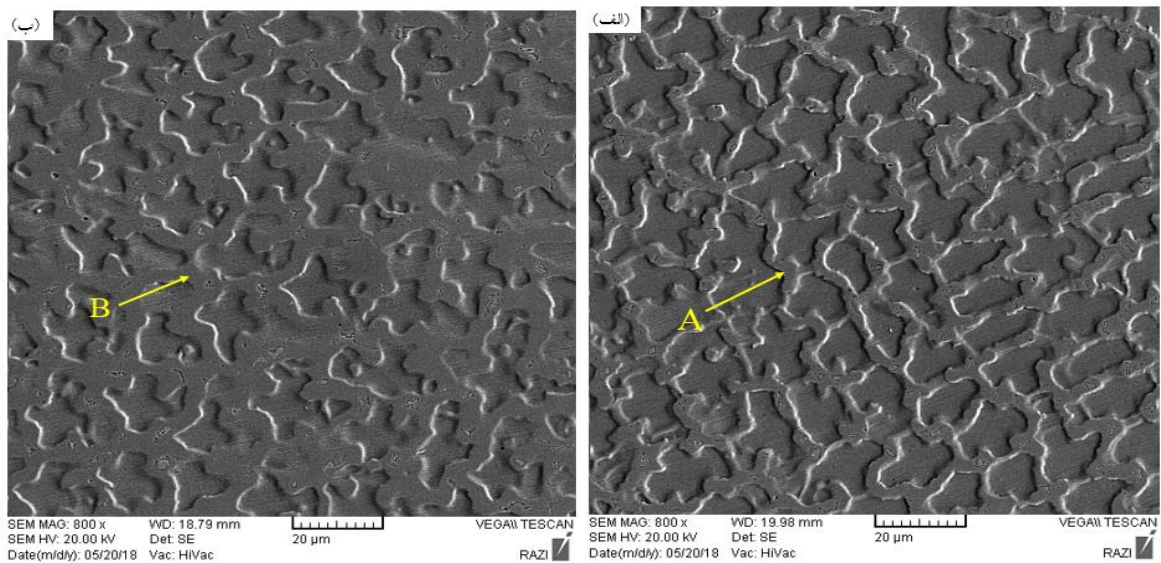
به منظور بررسی تأثیر فرکانس پالس بر ریزساختار فلز جوش، با ثابت نگه داشتن جریان بیشینه (۶۰ آمپر)، جریان زمینه (۴۰ آمپر) و درصد زمان روشن بودن (۵۰ درصد)، فرکانس در سه مقدار ۱۰، ۳۰ و ۵۰ هرتز تغییر داده شد. تصاویر نشان می‌دهند (شکل‌های ۱۳ و ۱۴) که با افزایش فرکانس پالس از ۱۰ تا ۵۰ هرتز دندریتهای هم‌محور در مرکز فلز جوش ریزتر می‌شوند. در پالس‌های با فرکانس پایین، اختلالات مکانیکی و حرارتی در حوضچه جوش شدت کمتری دارد. با افزایش فرکانس پالس، به دلیل زیادتیر شدن میزان ارتعاش در حوضچه مذاب، دندریتهای در حال رشد شکسته می‌شوند. نوک دندریتهای شکسته شده می‌توانند به عنوان محل‌های مناسب جهت جوانه زنی و رشد دندریتهای دیگر عمل کنند و در نهایت، باعث ریزدانه‌گی ساختار گردند. علاوه بر این با افزایش فرکانس توزیع حرارتی در حوضچه جوش و پایداری قوس نیز افزایش می‌یابد. شکل (۱۵) تغییرات اندازه دانه در نمونه‌های مورد استفاده بر حسب تغییرات فرکانس را نشان می‌دهد.

تحقیقات دیگر محققان نشان داد که با افزایش میزان فرکانس، عرض و عمق جوش افزایش می‌یابد. هنگامی که فرکانس افزایش می‌یابد، هم‌پوشانی پالس‌ها افزایش یافته و حرارت در فاصله زمانی کمتری به حوضچه وارد می‌شود. بنابراین دانسیته پالس‌ها افزایش یافته و ابعاد جوش افزایش می‌یابد [۱۷].

می‌گردد. انجماد دندریتی در فلز جوش با تشکیل محصولات ثانویه انجماد در فضا‌های بین دندریتی همراه بوده است. این ترکیبات بر اساس جدایش انجام شده در مراحل پایانی انجماد تشکیل شده و شامل رسوبات کاربیدی می‌باشند. بررسی تغییرات ترکیب شیمیایی غنی بودن این ترکیبات از مولیبدن و همچنین خالی بودن از کروم، نیکل و آهن را نشان می‌دهد. علت دیگر پس زده شدن مولیبدن به درون مذاب تفاوت زیاد شعاع اتمی آن با نیکل است، (بیش از ۹ درصد) درحالی‌که عناصر آهن و کروم که در حین انجماد درون دندریتهای مولیبدن باقی می‌مانند تفاوت شعاع اتمی آن‌ها با مولیبدن کم‌تر از یک درصد می‌باشد [۱۶]. این فازهای ثانویه نقش مکان‌های جوانه‌زنی برای ترک‌های گرم در فلز جوش را بازی می‌کنند. جهت بررسی دقیق‌تر میزان عناصر موجود در مناطق بین دندریتی از این مناطق آنالیز EDS تهیه شد. نتایج آورده شده در شکل (۱۰) نشان می‌دهد که درصد وزنی عنصر مولیبدن از ۵۲ درصد درحالت جوشکاری پالسی با جریان بیشینه ۸۰ و زمینه ۲۰ به ۲۸/۵۵ درصد درحالت جوشکاری پالسی با جریان بیشینه ۶۰ و زمینه ۴۰ کاهش یافته است. همچنین درصد وزنی عنصر آهن از ۵/۵۴ درصد درحالت جوشکاری پالسی با جریان بیشینه ۸۰ و زمینه ۲۰ به ۶/۸۸ درصد درحالت جوشکاری پالسی با جریان بیشینه ۶۰ و زمینه ۴۰ افزایش یافته است که این نتایج با دانسته‌های تئوری تطابق دارد. همچنین از تصاویر مشخص می‌باشد که با کاهش جریان بیشینه و افزایش جریان زمینه مناطق بین دندریتی کاهش می‌یابند.

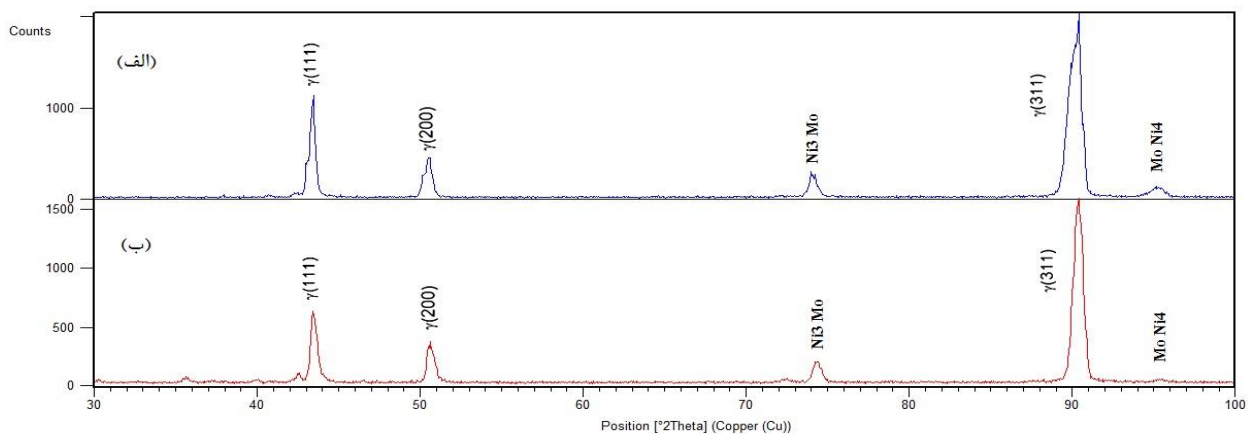
به منظور بررسی اثر جریان پالس بر درصد وزنی رسوبات از آنالیز XRD استفاده شد (شکل ۱۱). نتایج این آنالیز نیز کاهش درصد وزنی رسوبات با کاهش جریان بیشینه و افزایش جریان زمینه را نشان داد. همان‌گونه که بیان شد، علت این نفوذ ناچیز مولیبدن به مذاب بین دندریتی به دلیل سرعت سرد شدن زیاد می‌باشد.

تصاویر میکروسکوپی مربوط به فصل مشترک فلز جوش و ناحیه HAZ در شکل (۱۲) نشان داده شده است. تصویر میکروسکوپ نوری از منطقه متأثر از حرارت نمونه‌های

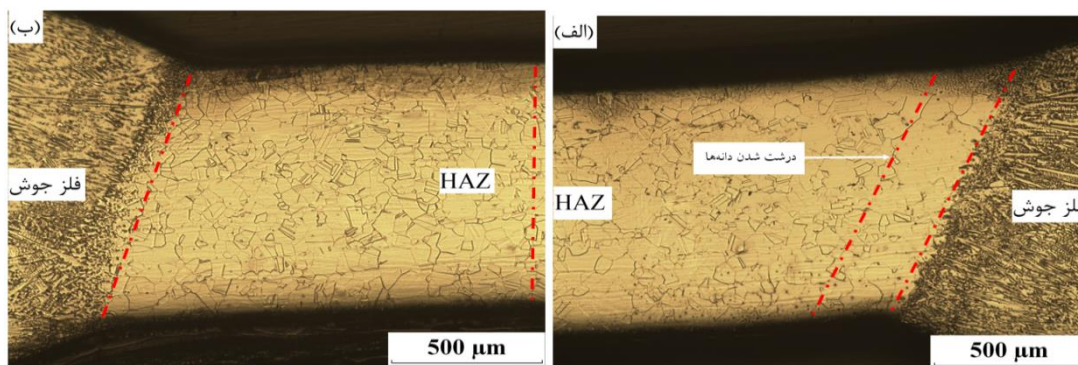


شکل ۱۰- تصویر میکروسکوپ الکترونی از فلزات جوش جریان پالسی الف) جریان بیشینه ۸۰ و زمینه ۲۰ ب) جریان بیشینه ۶۰ و زمینه ۴۰

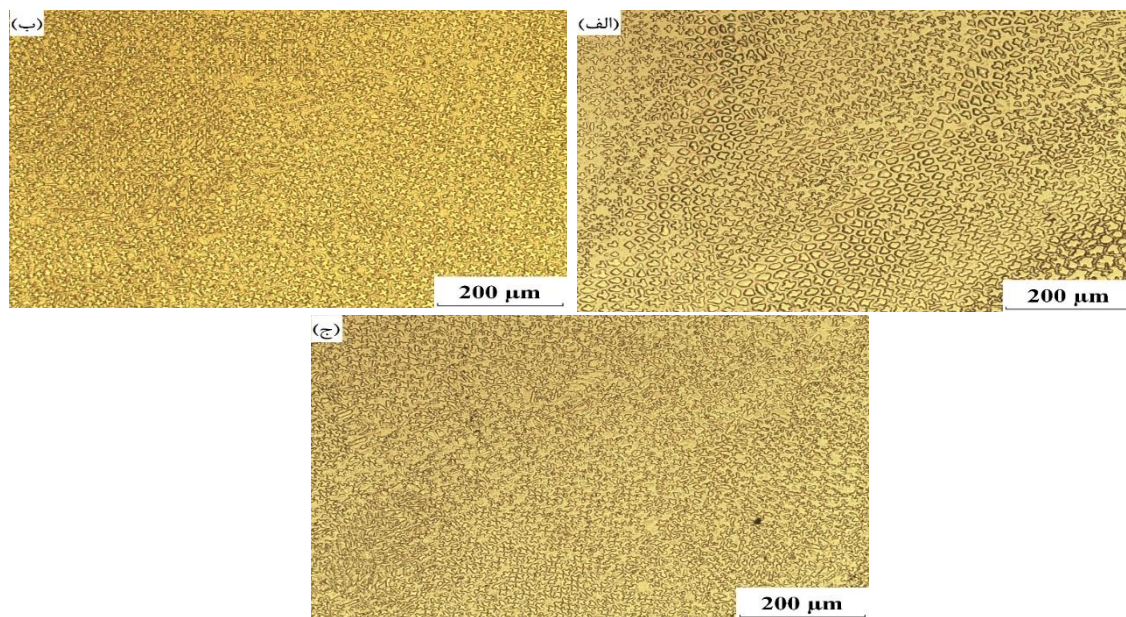
ج) آنالیز EDS از منطقه بین دندریتی A د) آنالیز EDS از منطقه بین دندریتی B



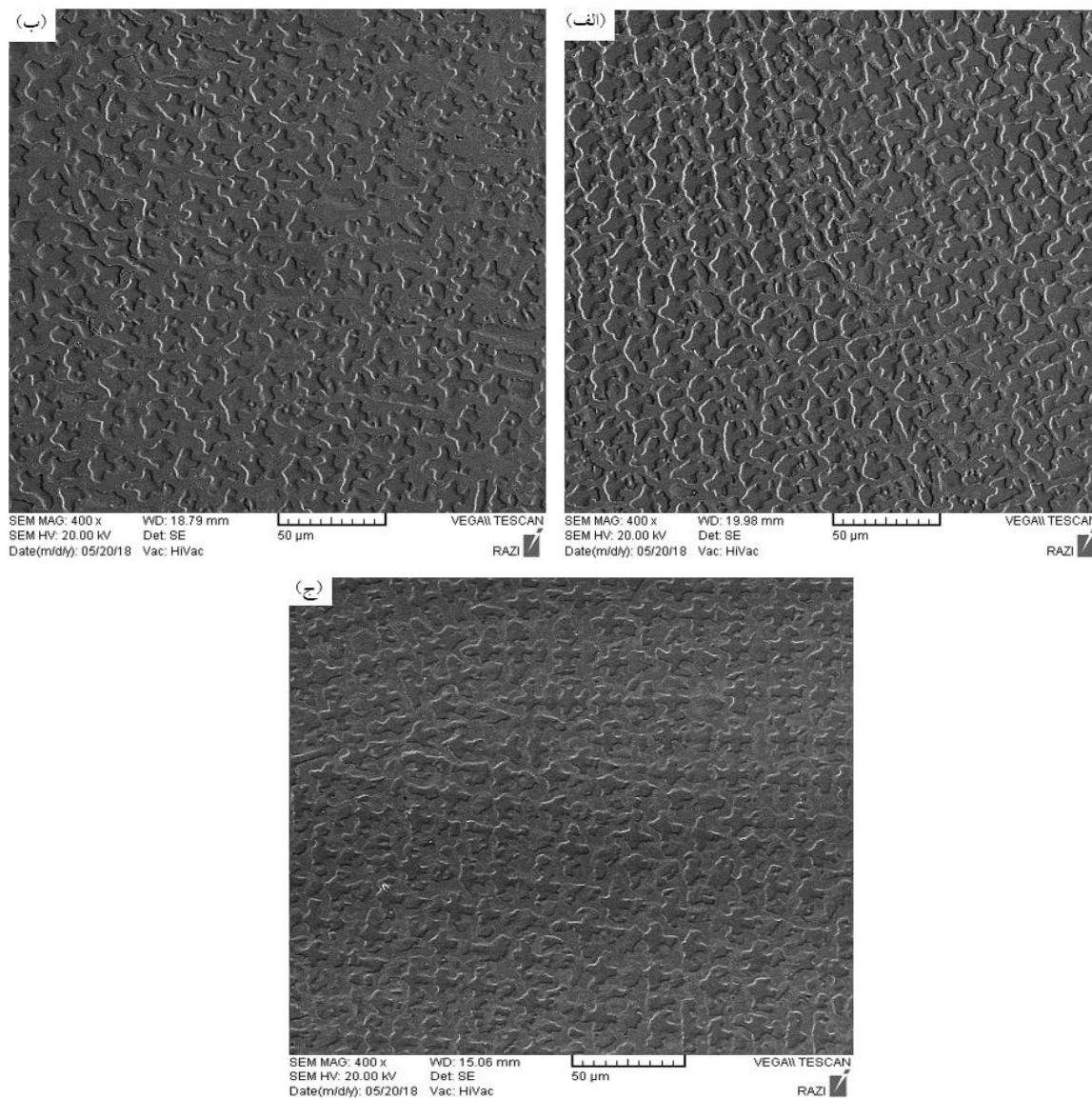
شکل ۱۱- نتایج آزمون XRD از فلز جوش الف) جریان بیشینه ۸۰ و جریان زمینه ۲۰ آمپر ب) جریان بیشینه ۶۰ و زمینه ۴۰ آمپر



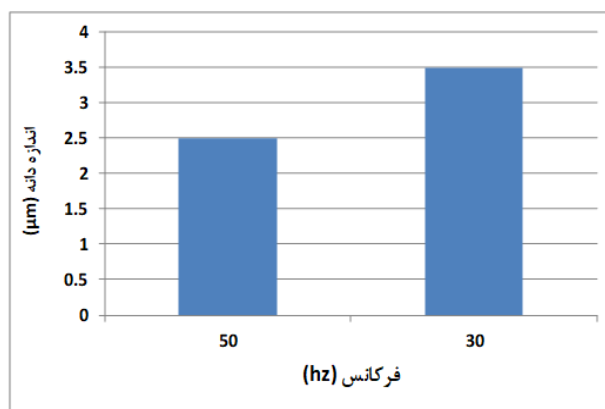
شکل ۱۲- تصویر میکروسکوپ نوری از منطقه HAZ الف) جریان بیشینه ۸۰ آمپر و جریان زمینه ۲۰ آمپر ب) جریان بیشینه ۶۰ آمپر و جریان زمینه ۴۰ آمپر



شکل ۱۳- تأثیر فرکانس پالس بر ریزساختار فلز جوش الف) ۱۰ هرتز ب) ۳۰ هرتز ج) ۵۰ هرتز



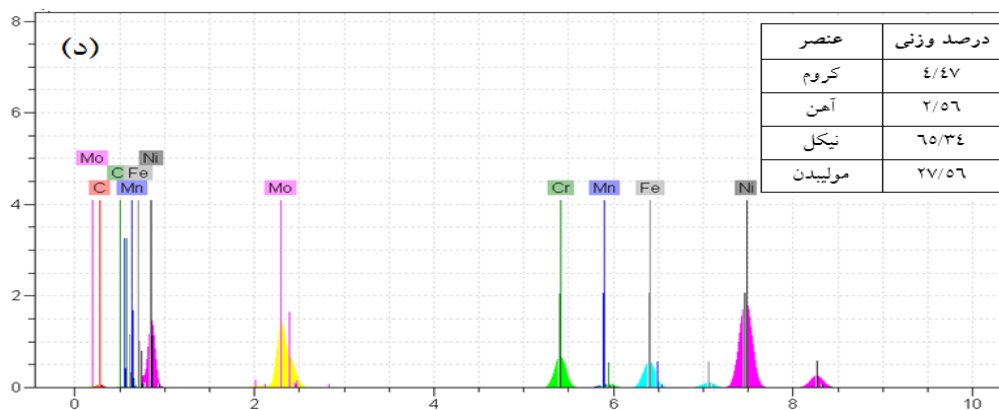
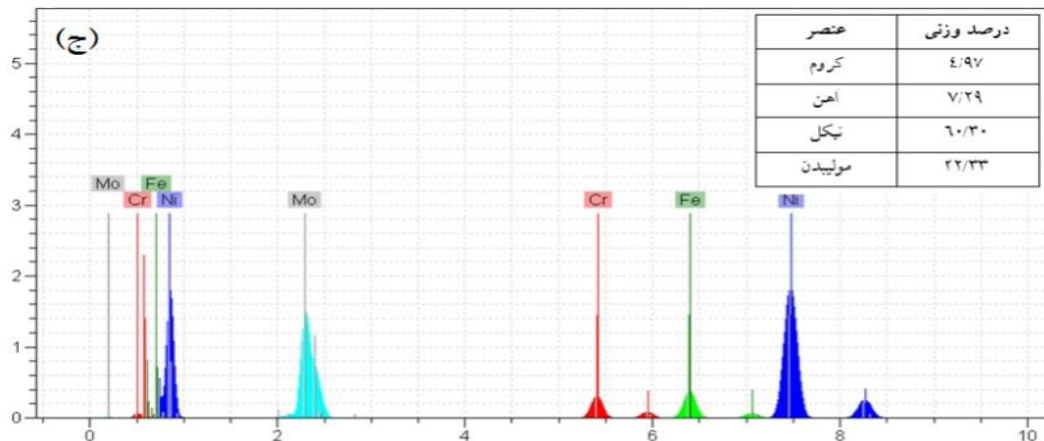
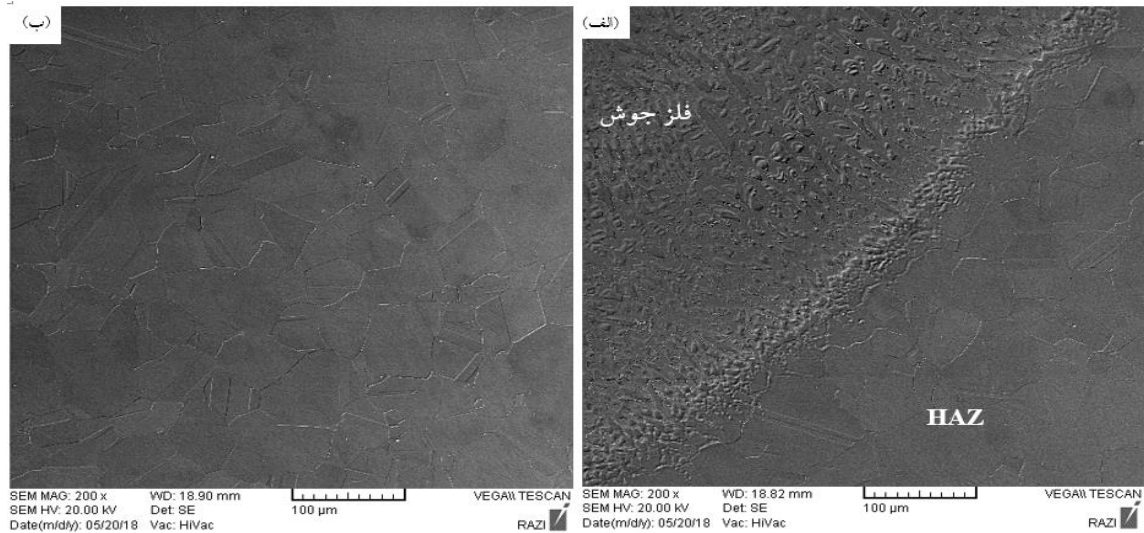
شکل ۱۴- تصویر میکروسکوپ الکترونی از تأثیر فرکانس پالس بر ریزساختار فلز جوش الف) ۱۰ هرتز ب) ۳۰ هرتز ج) ۵۰ هرتز



شکل ۱۵- تغییرات اندازه دانه بر حسب فرکانس

دمای منطقه HAZ به این محدوده دمایی نزدیک می‌شود، امکان حل شدن رسوبات در فلز پایه وجود دارد. همچنین نتایج آنالیز EDS افزایش میزان عناصر مولیبدن و نیکل در منطقه HAZ نسبت به فلز پایه را نشان می‌دهد که این امر می‌تواند موید حل شدن رسوبات در فاز آستنیت باشد.

تصاویر میکروسکوپ الکترونی از منطقه HAZ (شکل ۱۶) بیانگر کاهش میزان رسوبات Ni_3Mo و Ni_4Mo در این منطقه می‌باشد. همان‌گونه که اثبات شده، چنانچه فلز پایه در دماهای حدود ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شود، این رسوبات حل خواهند شد. از آنجا که در جوشکاری ذوبی



شکل ۱۶- تصویر میکروسکوپ الکترونی از منطقه HAZ (الف) مناطق نزدیک فصل مشترک (ب) منطقه HAZ در فواصل دورتر از فصل مشترک (ج) آنالیز EDS فلز پایه (د) آنالیز EDS منطقه HAZ

نتیجه گیری

۴- نتایج نشان می‌دهد که با کاهش جریان بیشینه و افزایش جریان زمینه مناطق بین دندریتی کاهش می‌یابد.

۵- نتایج نشان می‌دهد که با افزایش فرکانس از ۱۰ تا ۵۰ هرتز در فرآیند PC-GTAW، دندریتهای هم محور در مرکز جوش ریزتر می‌شوند.

۶- با افزایش فرکانس، توزیع حرارت در حوضچه جوش و پایداری قوس نیز افزایش می‌یابد.

۷- نتایج نشان می‌دهد کاهش جریان بیشینه، افزایش جریان زمینه و افزایش فرکانس، منجر به کاهش درصد وزنی رسوبات Ni_3Mo و Ni_4Mo شده است.

References:

[۱]- دوپونت.جان، لیپولد.جان، کیسر.ساموئل، "متالورژی جوشکاری و جوش پذیری آلیاژهای پایه نیکل"، شمعانیان، مرتضی پورمحمد، حسین، امینی، مهدی و مصطفایی، محمد، چاپ اول، انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی اصفهان، ۱۳۹۲.

[۲]- Charlie. R.Brooks And Wang. Y.M "Effect on the Microstructure of Aging Hastelloy B-2 from 552 to 852°C for 10222 Hours",Camdridge University Press, 1989.

[۳]- Charlie. R.Brooks And Wang. Y.M "Physical metallurgy of nickel-molybdenum alloys", Int. Met. Rev, 1984.

[۴]- DuPont. J.N, "Welding Metallurgy and Weld ability of Nickel-Base Alloys", Wiley, 2009.

[۵]- Pandit, S., Joshi, V., Agrawal, M., 2014, Investigations on Mechanical and Metallurgical Properties of Dissimilar Continuous GTA Welds of Monel 400 and C-276, Procedia Engeering.

[۶]- Wu, D., Ma, G., Gau, Y., 2010, Study of Weld Morphology on Thin Hastelloy C-

۱- بررسی‌ها نشان می‌دهد که ریزساختار سوپر آلیاژ Hastelloy B-2 دارای دانه‌های هم محور شده آستنیت به همراه رسوبات ریز است که درون دانه‌ها و در مرز دانه‌ها پراکنده شده‌اند.

۲- کاهش جریان بیشینه در فرآیند PC-GTAW منجر به کاهش حرارت ورودی به قطعه کار و کاهش شدید اندازه دندریت‌ها در فلز جوش شده است.

۳- نتایج نشان می‌دهد که فصل مشترک فلز جوش و HAZ با کاهش جریان بیشینه در فرآیند PC-GTAW، منجر به کاهش اندازه دانه‌های منطقه متأثر از حرارت شده است.

276 Sheet Of Pulsed Laser Welding, Physics Procedia.

[۷]- Manikandan, M., Arivazhagan, N., Nageswara Rao, M., Madhusudhan Reddy, G., 2015, Improvement of Microstructure and Mechanical Behavior of Gas Tungsten Arc Weldments of Alloy C-276 by Current Pulsing, Acta Metall. Sin. (Engl. Lett.).

[۸]- نجف‌زادگان، ف.، منصور، ح.، شمعانیان، م.، ۱۳۹۰، بررسی خواص مکانیکی ناحیه جوش آلیاژ Hastelloy X جوشکاری شده به روش لیزر پالسی، ششمین همایش مشترک انجمن مهندسين متالورژی و انجمن علمی ریخته‌گری ایران.

[۹]- WanxiaWanga,b, Li Jianga, Chaowen Lia, Bin Lenga, Xiang-Xi Yea, RenduoLiua, Shuangjian Chena, Kun Yua, Zhijun Lia, Xingtai Zhoua, Effects of post-weld heat treatment on microstructure and mechanical properties of Hastelloy N superalloy welds, Materials Today Communications 19 (2019) 230–237.

[۱۰]- ASME Sec IX, Qualification Standard for Welding and Brazing Procedure, Article II, Welding Procedure

- Qualification, 2001.
- [۱۱]- Cabot. C, Kokomo. I “Hastelloy alloy B2 ”, Gordon and Breach, 1977.
- [۱۲]- Smith. W.F, “Structure and Properties of Engineering Materials”, McGraw-Hill, 1987.
- [۱۳]- Tsunikawa.M., Ishikawa.M., Nakajima.M., “X-Ray Diffraction Studies of Austenite Stainless Steel Samples”, Shiga University Repository., 2013 .
- [۱۴]- Lippold, J.C. Welding metallurgy and weldability, John Wiley & Sons, 2014.
- [۱۵]- DuPont. J. N, Lippold. J. C, S. D. Kiser. “Welding Metallurgy and Weldability of Nickel-base Alloys”, John Wiley & Sons. Hoboken, New Jersey, 2009.
- [۱۶]- Manikandan. M, Arivazhagan. N, Nageswara Rao. M, Madhusudhan Reddy. G, “Improvement of Microstructure and Mechanical Behavior of Gas Tungsten Arc Weldments of Alloy C-276 by Current Pulsing”, Acta Metall. Sin.(Engl. Lett.), 2015.
- [۱۷]- Balasubramanian.V., Ravisankar.V., Madhusudhan.G., “Effect of pulsed current welding on mechanical properties of high strength aluminum alloy”, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2008.

