

## اثر متغیرهای جوشکاری میکروپلازما بر ریزساختار، ویژگی‌های مکانیکی و مقاومت الکتریکی آلیاژ حرارتی 80Ni-20Cr

حامد ثابت<sup>۱\*</sup>، بهزاد بهنام<sup>۲</sup> و محمدرضا شادی<sup>۳</sup>

### چکیده

در این پژوهش، اثر متغیرهای جوشکاری (شدت جریان، جوشکاری پالسی و غیر پالسی) بر ریزساختار، ویژگی‌های مکانیکی (کشش و سختی) و مقاومت الکتریکی آلیاژ 80Ni-20Cr بررسی شده است. برای این منظور، مفتول هایی به قطر ۲ میلی متر تهیه و در شرایط گوناگون مورد جوشکاری قرار گرفتند. سپس نمونه هایی جهت بررسی متالوگرافی نوری، SEM، آزمون کشش، سختی و مقاومت الکتریکی تهیه شدند. نتایج آزمون‌های متالوگرافی نوری و SEM نشان دادند که ریزساختار انجمادی تمامی نمونه‌ها از دانه‌های کروی هم محور تشکیل شده بودند که با افزایش شدت جریان جوشکاری میانگین قطر دانه‌ها و اندازه میانگین کاربیدهای  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  و TiC در هر دو شرایط جوشکاری غیر پالسی و پالسی افزایش یافتند. افزون بر این، بررسی های متالوگرافی نشان دادند که مرز ذوب تمامی نمونه‌ها از سه ناحیه انجمادی صفحه ای، سلولی و دندریتی تشکیل شده است که عرض این ناحیه‌ها با افزایش شدت جریان جوشکاری افزایش یافتند. منطقه HAZ نیز در تمام نمونه‌ها از دو ناحیه دانه درشت و دانه ریز تشکیل شده بود که با افزایش شدت جریان جوشکاری میانگین اندازه قطر دانه‌ها در هر دو شرایط جوشکاری غیر پالسی و پالسی افزایش یافتند. نتایج آزمون کشش و سختی نشان دادند که با افزایش شدت جریان جوشکاری در هر دو شرایط جوشکاری غیر پالسی و پالسی، استحکام کششی و سختی اتصال کاهش می‌یابند. در مقابل، در یک شدت جریان جوشکاری ثابت، جوشکاری پالسی باعث افزایش استحکام کششی و سختی اتصال نسبت به جوشکاری غیر پالسی گردید. نتایج آزمون مقاومت الکتریکی نیز نشان داد که مقاومت الکتریکی تمامی نمونه‌ها تابعی از میانگین قطر دانه‌ها و وضعیت رسوب کاربیدها در ریزساختار می‌باشد و مناسب‌ترین (کمترین) مقاومت الکتریکی در شرایط جوشکاری با شدت جریان ۱۰ آمپر به صورت پالسی بدست آمد.

واژه های کلیدی: جوشکاری میکروپلازما، ریزساختار، ویژگی‌های مکانیکی، مقاومت الکتریکی، 80Ni-20Cr.

۱- استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج، گروه مهندسی مواد و متالورژی.

۲- مربی دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج، گروه مهندسی برق و الکترونیک.

۳- کارشناس ارشد مهندسی مواد دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساوه.

\*- نویسنده مسئول مقاله: h-sabet@kiauo.ac.ir

## پیشگفتار

آلیاژهای مقاومت الکتریکی<sup>۱</sup> که به آلیاژهای حرارتی<sup>۲</sup> (و آلیاژ المنت<sup>۳</sup>) مشهورند، گروهی از آلیاژها می باشند که در کاربردهای مقاومت الکتریکی مورد استفاده قرار می گیرند [۱]. از مهم ترین ویژگی های این آلیاژها می توان به مقاومت الکتریکی و مقاومت به خزش بالا، ضریب انبساط خطی کم، شکل پذیری مناسب و مقاومت به خوردگی خوب در دمای بالا اشاره کرد [۱ و ۲]. از این رو، این آلیاژها در ساخت المنت های حرارتی خانگی و صنعتی و همچنین کوره های الکتریکی مقاومتی (ذوب و عملیات حرارتی) بکار می روند [۲ و ۳]. این آلیاژها معمولاً به صورت سیم توپر به قطرهای ۰/۱ تا ۴ میلی متر به روش کشش مفتول تولید می شوند [۳]. از نقطه نظر دسته بندی، این مواد به ۴ خانواده تقسیم می شوند که عبارتند از [۲-۴]:

الف- آلیاژهای پایه نیکل

ب- آلیاژهای پایه آهن

ج- فلزات خالص

د- مواد غیر فلزی

از نقطه نظر کاربردی، آلیاژهای پایه نیکل در محدوده دمایی ۴۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد در محیط های غیر اکسیدی، آلیاژهای پایه آهن در محدوده دمایی ۵۰۰ تا ۱۵۰۰ درجه سانتی گراد برای محیط های غیر اکسیدی و فلزات خالص (مولیبدن - تنگستن) و مواد غیر فلزی (سیلیسیم کاربرد- گرافیت) در محدوده دمایی ۵۰۰ تا ۱۹۰۰ درجه سانتی گراد برای محیط های اکسیدی و غیر اکسیدی بکار می روند [۳ و ۴]. در بین مواد ذکر شده، آلیاژهای پایه نیکل به گونه ای وسیع در کوره های ذوب مقاومتی فلزات غیر آهنی و همچنین کوره های عملیات حرارتی و صنعتی مورد استفاده قرار می گیرند. این خانواده خود به ۴ گروه آلیاژی زیر تقسیم بندی می شود [۱، ۴ و ۵]:

الف- Ni-Cr

ب- Ni-Cr-Si

ج- Ni-Cr-Fe

د- Ni-Cr-Fe-Si

که در بین گروه های آلیاژی یاد شده، آلیاژ Ni-Cr پرکاربردترین خانواده این آلیاژ بشمار می رود زیرا از مقاومت الکتریکی و شکل پذیری بالاتری نسبت به سایر آلیاژها برخوردار است [۵ و ۶]. آلیاژهای Ni-Cr به دو دسته زیر تقسیم بندی می شوند [۶ و ۷]:

۱- آلیاژ 80Ni-20Cr

۲- آلیاژ 70Ni-30Cr

در هنگام ساخت کوره های صنعتی (بزرگ) همواره بحث اتصال آلیاژهای مقاومت الکتریکی مطرح است. مهم ترین روش های اتصال این آلیاژها عبارتند از [۶ و ۸]:

الف- لحیم کاری سخت و نرم<sup>۴</sup>

ب- جوشکاری مقاومتی سربه سر فشاری<sup>۵</sup>

ج- جوشکاری اکسی استیلن<sup>۶</sup>

د- جوشکاری قوس الکتریکی (تنگستن تحت پوشش گاز محافظ<sup>۷</sup> و قوس پلازما<sup>۸</sup>)

ه- جوشکاری اشعه ای (الکترونی<sup>۹</sup> و لیزر<sup>۱۰</sup>)

از مهم ترین مشکلات جوشکاری این آلیاژها می توان به ذوب سریع و ناگهانی این آلیاژها به دلیل قابلیت انتقال حرارت کم آنها اشاره کرد که در نتیجه باعث عدم اتصال مناسب، تابیدگی شدید، تشکیل تخلخل و شکل نامناسب اتصال اشاره کرد که این عوامل باعث ایجاد مقاومت الکتریکی نامناسب (کم یا زیاد) در محل اتصال می گردند [۸] که در نهایت، باعث تغییر رژیم حرارتی کوره ها<sup>۱۱</sup> و توزیع نا یکنواخت حرارت در آنها می گردد [۸ و ۹]. همین موضوع باعث گردیده است که اتصال این آلیاژها از راه جوشکاری عمدتاً انجام نپذیرد یا با موفقیت کم همراه باشد. لذا، بر همین اساس اتصال این آلیاژها توصیه نمی گردد و در صورت نیاز استفاده از لحیم کاری سخت یا نرم به جای جوشکاری پیشنهاد می گردد. در شرایط خاص

4 - Brazing and Soldering

5 - Upset Resistance Welding

6 - Oxy Acetylene Welding (OAW)

7 - Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)

8 - Plasma Arc Welding (PAW)

9 - Electron Beam Welding (EBW)

10 - Laser Beam Welding (LBW)

11 - Heating Regime

1 - Electrical Resistance Alloys

2 - Heating Alloys or Thermo Alloys

3 - Element Alloy

هنگام انجماد می‌باشد. همچنین، آنها مشخص نمودند که با افزایش شدت جریان جوشکاری (از ۳۰ به ۵۰ آمپر) و افزایش حرارت ورودی جوشکاری شیب دمایی مذاب (G) افزایش یافته که در نتیجه اندازه دانه‌های مستقل در قسمت مرکزی حوضچه مذاب تغییر می‌نمایند. عنوان شده است [۹ و ۱۴] که جوشکاری میکرو پلازما روشی مناسب جهت اتصال قطعات با کمترین حرارت ورودی و تابیدگی می‌باشد. از آنجایی که برای اتصال آلیاژهای حرارتی توصیه شده است تا از حداقل حرارت ورودی جوشکاری بهره گرفته شود [۸ و ۱۰] و از سوی دیگر، نبود پژوهش مشخصی در خصوص جوشکاری ذوبی این دسته از آلیاژها با حرارت ورودی کم، این پژوهش برنامه ریزی و اجرا شده است و در آن هدف، بررسی ریزساختار، ویژگی‌های مکانیکی (کشش و سختی) و مقاومت الکتریکی اتصال آلیاژ حرارتی 80Ni-20Cr جوشکاری شده به روش میکروپلازما می‌باشد.

### روش پژوهش

جهت انجام پژوهش، مفتول المنبت حرارتی 80Ni-20Cr به قطر ۲ میلی‌متر و ترکیب شیمیایی ارایه شده در جدول ۱ بکار گرفته شد. جهت عملیات جوشکاری ابتدا مفتول‌ها به طول ۱۵ سانتی‌متر برش خورده و سطح برش آنها تحت سنگ (زنی) مغناطیسی قرار گرفته و سپس در یک فیکسچر مناسب قرار داده شدند تا طرح اتصال سر به سر گونیا بدون درز ایجاد گردد. عملیات جوشکاری به روش میکروپلازما با دستگاه مدل Thermo Welding Ariane 80-S محصول شرکت بدون فلز پرکننده در شرایط گوناگون انجام شد. متغیرهای جوشکاری با توجه به قابلیت دستگاه، شدت جریان جوشکاری و جوشکاری در شرایط غیر پالسی و پالسی در نظر گرفته شد و در نهایت، ۹ نمونه بر اساس شرایط ذکر شده در جدول ۲ مورد عملیات جوشکاری قرار گرفته شدند.

پس از جوشکاری، آزمون‌های متالوگرافی نوری و الکترونی، سختی، کشش و مقاومت الکتریکی در مورد نمونه‌های گوناگون انجام شد. جهت انجام متالوگرافی ابتدا

برای اتصال از راه جوشکاری استفاده از حداقل حرارت ورودی جوشکاری به همراه فیکسچر مناسب باید مدنظر قرار گیرد [۸-۱۰].

با توجه به قابلیت جوش پذیری بسیار کم این دسته از آلیاژها پژوهش‌های نسبتاً کمی درباره اتصالات این آلیاژها به روش جوشکاری انجام شده است. پهلوان و همکارانش [۱۱] ویژگی‌های مکانیکی اتصال آلیاژ 80Ni-20Cr را به روش جوشکاری مقاومتی سر به سر فشاری مورد بررسی قرار دادند. نتایج بررسی آنها مشخص کرد که با افزایش توان دستگاه (در فشار و زمان ثابت) استحکام شکست اتصال به صورت تدریجی (تا ۱۳۰۰ وات) افزایش می‌یابد که ناشی از کاهش میانگین قطر دانه‌ها در محل اتصال عنوان شده است. همچنین، آنها مشخص نمودند که با افزایش زمان جوشکاری از ۰/۵ به یک ثانیه (در فشار و توان ثابت) استحکام شکست اتصال افزایش می‌یابد که این امر را ناشی از خروج بیش‌تر مذاب از درز اتصال و ایجاد شیب حرارتی تند در محل اتصال توجیح نموده‌اند.

حلوایی و همکارانش [۱۲] در پژوهش مشابه مقاومت الکتریکی اتصال آلیاژ 80Ni-20Cr جوشکاری شده به روش مقاومتی سر به سر فشاری را مورد بررسی قرار دادند، نتایج پژوهش‌ای آنها مشخص نمود که با افزایش توان جوشکاری (تا ۱۷۰۰ وات) قطر دانه‌ها در منطقه اتصال کاهش می‌یابد که بدین ترتیب با افزایش مرزدانه‌ها مقاومت الکتریکی اتصال افزایش می‌یابد. همچنین، آنها مشخص نمودند که با افزایش زمان جوشکاری از ۰/۵ به یک ثانیه در یک توان ثابت جوشکاری (۸۰۰ وات) قطر دانه‌ها افزایش مرز دانه‌ها کاهش و به تبع آن مقاومت الکتریکی اتصال کاهش می‌یابد.

افخمی و همکارش [۱۳] جوش پذیری آلیاژ 80Ni-20Cr را به روش جوشکاری GTAW<sup>1</sup> (TIG) با استفاده از فلز پرکننده مورد بررسی قرار دارند. نتایج بررسی آنها مشخص نمود که ساختار انجمادی نمونه‌ها در مرز ذوب به سمت مرکز حوضچه به صورت انجماد صفحه ای، سلولی، دندریتی و مستقل می‌باشد که نشان دهند تغییر در نسبت  $\frac{G}{R}$  (شیب  $\frac{G}{R}$  در حوضچه مذاب در سرعت رشد

<sup>1</sup> - Tungsten Inert Gas

GOM-802 محصول شرکت Gwinstek برای هر یک از نمونه‌ها انجام شد.

## نتایج و بحث

### ریزساختار

#### فلز پایه

شکل ۱ ریزساختار میکروسکوپ الکترونی (SEM) فلز پایه را در شرایط تصویر برداری به روش الکترون ثانویه نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل مشخص است، ریزساختار فلز پایه از دانه‌های آستنیت با میانگین قطر ۸ میکرومتر تشکیل شده است. همچنین، در ریزساختار ۲ نوع ذرات رسوبی مشاهده می‌شود، نتایج آزمون EDS مشخص می‌کند که ذرات بزرگ‌تر با میانگین اندازه ۳/۵ میکرومتر (بدست آمده از میانگین اندازه گیری ۱۰ ذره) غنی از عنصر تیتانیوم (و کربن) بوده و ذرات کوچک‌تر با میانگین اندازه ۱/۵ میکرومتر (بدست آمده از میانگین اندازه گیری ۱۰ ذره) غنی از عنصر کروم (و کربن) می‌باشند. جدول ۳ آنالیز EDS از ذرات یاد شده را ارائه می‌دهد. همان‌گونه که از جدول ۳ مشخص است، با توجه به درصد اتمی عناصر تشکیل دهنده مشخص می‌شود که ذرات بزرگ‌تر (غنی از عناصر تیتانیوم و کربن)، کاربرد TiC و ذرات کوچک‌تر (غنی از عناصر کروم و کربن)، کاربرد  $Cr_{23}C_6$  می‌باشند.

#### فلز جوش

شکل ۲ ریز ساختار میکروسکوپی نوری مرز ذوب را در نمونه‌های جوشکاری شده با شدت جریان ۹ آمپر در دو حالت غیر پالسی و پالسی نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل ۲ الف و ب مشخص است، انجماد در هر دو حالت به صورت صفحه‌ای شروع شده است و پس از کاهش شیب دمایی (G) و افزایش تدریجی سرعت رشد (R) (کاهش  $\frac{G}{R}$ ) انجماد به صورت سلولی و دندریتی ادامه یافته است و در مرکز حوضچه به صورت ساختار مستقل تبدیل شده است. گفتنی است که ساختار فلز جوش تمامی نمونه‌ها از نوع دانه‌های کروی هم محور بودند. جدول ۴ عرض مناطق رشد صفحه‌ای، سلولی و دندریتی در مرز ذوب را برای نمونه‌های گوناگون ارائه می‌دهد.

دو سمت محل اتصال نمونه‌ها برش خورده و پس از مانند سرد مورد عملیات آماده سازی (سنباده زنی) و پولیش با محلول کروندم ۰/۳ میکرومتر و سپس حکاکی با محلول (آبی)  $40\%HNO_3 + 60\%HCl$  قرار گرفتند. آزمون متالوگرافی طی ۲ مرحله انجام شد؛ در مرحله نخست، متالوگرافی نوری با استفاده از یک دستگاه میکروسکوپ نوری مدل BX51M محصول شرکت Olympus مجهز به سیستم آنالیز تصویری<sup>۱</sup> انجام گردید. در این مرحله میانگین قطر دانه‌ها و درصد رسوبات (کاربیدها) در ریزساختار فلز جوش و HAZ<sup>۲</sup> مورد بررسی قرار گرفته شدند. در مرحله دوم جهت بررسی دقیق‌تر جزئیات ریزساختار، تمامی نمونه‌ها به وسیله یک دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>۳</sup> (SEM) مدل VEGA/TESCAN مجهز به سیستم تصویربرداری الکترون برگشتی<sup>۴</sup> و الکترون ثانویه<sup>۵</sup> تحت ولتاژ شتاب دهنده ۲۰ کیلو ولت مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین، جهت بررسی دقیق‌تر رسوبات و ذرات موجود در ریزساختار، آنالیز نقطه ای<sup>۶</sup> به روش اسپکتروسکوپی انرژی پراکنده<sup>۷</sup> (EDS) در مورد فازهای مورد نظر انجام شد.

آزمون سختی میکروسکوپی با استفاده از دستگاه مدل Duramin محصول شرکت Struers تحت نیروی اعمال ۲۰۰ گرم روی فلز جوش و ناحیه HAZ (به صورت طولی) انجام گرفت. آزمون کشش مفتول نیز بر اساس استاندارد EN10002 با دستگاه مدل Lx محصول شرکت Instron با سرعت کشش  $1 \frac{mm}{min}$  انجام گردید.

گفتنی است که جهت افزایش دقت نتایج آزمون‌ها، سختی سنجی دست‌کم در ۳ نقطه گوناگون و آزمون کشش روی ۲ نمونه انجام گرفت که میانگین نتایج آنها معیار آزمون‌های مربوطه قرار گرفتند. آزمون مقاومت الکتریکی نیز به روش چهار نقطه‌ای بر اساس استاندارد ASTM B70 در دمای محیط با دستگاه مدل

1 - Image Analysis

2 - Heat Affected Zone (HAZ)

3 - Scanning Electron Microscope (SEM)

4 - Back -Scattered Electrons (BSE)

5 - Secondary Electrons (SE)

6 - Point Analysis

7 - Energy Dispersive Spectroscopy (EDS)

جدول ۵ هم‌چنین، درصد حجمی و میانگین اندازه کاربیده‌های  $Cr_{23}C_6$  و کاربیده‌های TiC در ریزساختار فلز جوش نمونه‌های گوناگون را ارائه می‌دهد. همان‌گونه که از جدول ۵ مشخص است، درصد حجمی کاربیده‌های  $Cr_{23}C_6$  و کاربیده‌های TiC در شرایط گوناگون جوشکاری تفاوتی با یکدیگر و هم‌چنین، با فلز پایه ندارند که نشان دهنده نبود تغییر در ترکیب شیمیایی (عدم سوختن عناصر) فلز جوش می‌باشد. در مقابل میانگین اندازه کاربیده‌های  $Cr_{23}C_6$  و TiC در شرایط گوناگون جوشکاری با یکدیگر متفاوت هستند. شکل ۴ الف و ب ارتباط بین میانگین اندازه کاربیده‌های  $Cr_{23}C_6$  و TiC را بر حسب شدت جریان جوشکاری در شرایط جوشکاری غیر پالسی و پالسی نشان می‌دهد. همان‌گونه که از جدول ۵ و شکل ۴ الف و ب مشخص است، با افزایش شدت جریان جوشکاری (از ۹ به ۱۱ آمپر) در هر دو شرایط جوشکاری غیر پالسی و پالسی میانگین اندازه کاربیده‌های  $Cr_{23}C_6$  و TiC افزایش می‌یابد، به گونه‌ای که بیش‌ترین میانگین اندازه کاربیده‌های  $Cr_{23}C_6$  (۳/۵ میکرومتر) و کاربیده‌های TiC (۵/۵ میکرومتر) (بدست آمده از میانگین اندازه گیری ۱۰ عدد کاربید) مربوط به فلز جوش نمونه جوشکاری شده با شدت جریان ۱۱ آمپر در شرایط غیر پالسی می‌باشد. علت افزایش میانگین اندازه کاربیده‌های  $Cr_{23}C_6$  و TiC در فلز جوش ناشی از افزایش زمان انجماد حوضچه مذاب با افزایش حرارت ورودی جوشکاری (افزایش شدت جریان جوشکاری) است که شرایط را برای ادغام کاربیده‌های تشکیل شده در مذاب فراهم نموده است. از سوی دیگر، بررسی جدول ۵ و شکل ۴ الف و ب مشخص می‌کند که در یک شدت جریان جوشکاری ثابت، استفاده از جوشکاری پالسی باعث کاهش اندازه میانگین کاربیده‌های  $Cr_{23}C_6$  و TiC در فلز جوش می‌گردد.

شکل ۵ تصویر میکروسکوپی نوری از اندازه کاربیده‌های  $Cr_{23}C_6$  و TiC موجود در فلز جوش نمونه جوشکاری شده با شدت جریان ۹ آمپر را به صورت مقایسه‌ای در دو شرایط غیر پالسی و پالسی نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل مشخص است، اندازه کاربیده‌های  $Cr_{23}C_6$  و TiC در فلز جوش نمونه جوشکاری شده با جریان پالسی

دهد. همان‌گونه که از جدول ۴ مشخص است، با افزایش شدت جریان جوشکاری (از ۹ به ۱۱ آمپر) در هر دو شرایط جوشکاری غیر پالسی و پالسی، عرض مناطق رشد صفحه‌ای، سلولی و دندریتی افزایش یافته است که علت آن ناشی از افزایش حرارت ورودی جوشکاری با افزایش شدت جریان جوشکاری می‌باشد. افزایش حرارت ورودی جوشکاری باعث افزایش شیب حرارتی مذاب حوضچه می‌گردد که بدین ترتیب شرایط برای رشد بیش‌تر مناطق یاد شده فراهم می‌شود [۱۴ و ۱۵]. هم‌چنین بررسی جدول ۴ مشخص می‌کند که در یک شدت جریان جوشکاری ثابت، استفاده از جوشکاری پالسی باعث کاهش عرض مناطق رشد صفحه‌ای، سلولی و دندریتی می‌گردد (مقایسه شکل‌های ۲ الف و ب) که علت آن ناشی از تلاطم جزئی ایجاد شده در اثر جوشکاری با جریان پالسی می‌باشد. این تلاطم باعث می‌گردد تا امکان رشد مناطق صفحه‌ای، سلولی و دندریتی کاهش یابد [۱۵].

جدول ۵ نتایج آزمون متالوگرافی فلز جوش نمونه‌های گوناگون را ارائه می‌دهد. شکل ۳ ارتباط بین میانگین قطر دانه‌های فلز جوش نمونه‌های گوناگون را بر حسب شدت جریان جوشکاری در شرایط غیر پالسی و پالسی نشان می‌دهد. همان‌گونه که از جدول ۵ و شکل ۳ مشخص است با افزایش شدت جریان جوشکاری (از ۹ به ۱۱ آمپر) در هر دو شرایط جوشکاری غیر پالسی و پالسی میانگین قطر دانه‌ها افزایش یافته است، به گونه‌ای که بیش‌ترین میانگین قطر دانه‌ها (۳۵ میکرومتر) فلز جوش، مربوط به نمونه جوشکاری شده با شدت جریان ۱۱ آمپر در شرایط غیر پالسی می‌باشد. علت این امر ناشی از ارتباط بین (افزایش) زمان انجماد فلز جوش و (افزایش) حرارت ورودی جوشکاری می‌باشد [۱۵ و ۱۹]. بررسی شکل ۳ هم‌چنین، مشخص می‌کند که در یک شدت جریان جوشکاری ثابت، استفاده از جوشکاری پالسی باعث کاهش میانگین قطر دانه‌های فلز جوش (کمترین میانگین قطر دانه‌ها ۱۵ میکرومتر) می‌گردد که علت آن ناشی از افزایش تعداد جوانه‌ها در اثر تلاطم مذاب می‌باشد [۹، ۱۰ و ۱۱].

کوچکتر از نمونه جوشکاری شده با جریان غیر پالسی می باشد.

### منطقه تحت تأثیر حرارت (HAZ)

شکل ۶ تصویر میکروسکوپی نوری اندازه دانه های منطقه HAZ نمونه جوشکاری شده با شدت جریان ۱۰ آمپر را در شرایط غیر پالسی نشان می دهد. همان گونه که از شکل ۶ مشخص است، منطقه HAZ از ۲ ناحیه دانه درشت<sup>۱</sup> و دانه ریز<sup>۲</sup> با دانه های کروی شکل (به همراه دوقلوبی آنیل) تشکیل شده است. علت وجود دو ناحیه دانه درشت و دانه ریز در منطقه HAZ ناشی از تفاوت در دمای بیشینه و نقش کاربیدها در ریزساختار می باشد [۹ و ۱۴]. در مناطق نزدیک مرز ذوب به علت بالاتر بودن دمای منطقه HAZ فرصت کافی برای ادغام دانه ها از راه رشد آنها مهیا می باشد. بدین ترتیب منطقه دانه درشت در نزدیک مرز ذوب تشکیل می گردد. در مناطق دورتر از مرز ذوب به علت وجود دمای بیشینه پایین تر شرایط برای رشد و حرکت مرز دانه ها به راحتی امکان پذیر نبوده و وجود کاربیدها مانع رشد مرزهای دانه می شود [۱۴ و ۱۵] که بدین ترتیب منطقه دانه ریز تشکیل می شود.

جدول ۶ جزئیات ریزساختار منطقه HAZ نمونه های گوناگون را ارائه می دهد. همان گونه که از جدول ۶ مشخص است، عرض ناحیه دانه درشت و دانه ریز نمونه های جوشکاری شده با یکدیگر متفاوت هستند. به گونه ای که با افزایش شدت جریان جوشکاری (از ۹ به ۱۱ آمپر) در هر دو شرایط جوشکاری غیر پالسی و پالسی عرض ناحیه دانه درشت و دانه ریز افزایش می یابد. بیشترین عرض ناحیه دانه درشت (۲۵۰ میکرومتر) و دانه ریز (۸۰ میکرومتر)، مربوط به نمونه جوشکاری شده با شدت جریان ۱۱ آمپر در شرایط غیر پالسی می باشد. علت این امر ناشی از ارتباط بین حرارت ورودی جوشکاری و عرض ناحیه HAZ می باشد. از آنجایی که با افزایش حرارت ورودی جوشکاری زمان بیش تری برای رشد و ادغام مرز دانه های خود دارند [۹]. لذا، این امر باعث می گردد که با افزایش شدت جریان جوشکاری و افزایش حرارت ورودی جوشکاری میانگین قطر دانه ها در ناحیه های گوناگون HAZ افزایش یابد. از سوی دیگر، مقایسه شکل های ۷

می یابد [۹ و ۱۴]. از سوی دیگر، با مقایسه نتایج جدول ۶ مشخص می گردد که در یک شدت جریان جوشکاری ثابت، عرض ناحیه های دانه درشت و دانه ریز در شرایط جوشکاری پالسی کمتر از جوشکاری غیر پالسی است. به گونه ای که کمترین عرض ناحیه دانه درشت (۱۰ میکرومتر) و دانه ریز (۵۰ میکرومتر) مربوط به نمونه جوشکاری شده با شدت جریان ۹ آمپر در شرایط پالسی می باشد. علت این امر ناشی از حرارت ورودی کمتر جوشکاری پالسی است. از آنجایی که در جوشکاری پالسی شدت جریان بیشینه و کمینه وجود دارد (جدول ۲) لذا، حرارت ورودی جوشکاری به صورت میانگین حرارت ورودی ناشی از شدت جریان بیشینه و کمینه تعریف می شود. این موضوع باعث می گردد که میانگین مقدار حرارت ورودی جوشکاری پالسی کمتر از جوشکاری غیر پالسی باشد [۱۴ و ۱۶] در نتیجه، عمق نفوذ حرارت در منطقه HAZ در جوشکاری پالسی کمتر از جوشکاری غیر پالسی است که این موضوع در نتایج ارائه شده در جدول ۶ به خوبی مشخص است.

شکل ۷ الف و ب ارتباط بین میانگین قطر دانه های ناحیه دانه درشت و دانه ریز را با شدت جریان جوشکاری نشان می دهد. همان گونه که از شکل ۷ و جدول ۶ مشخص است، با افزایش شدت جریان جوشکاری (از ۹ به ۱۱ آمپر) در شرایط جوشکاری غیر پالسی و پالسی میانگین قطر دانه های ناحیه دانه درشت و دانه ریز افزایش می یابد، به گونه ای که بیشترین میانگین قطر دانه ها در ناحیه دانه درشت (۵۰ میکرومتر) و در ناحیه دانه ریز (۸ میکرومتر) مربوط به نمونه جوشکاری شده با شدت جریان ۱۱ آمپر در شرایط غیر پالسی است. علت این امر ناشی از اثر افزایش حرارت ورودی جوشکاری می باشد. از آنجایی که افزایش حرارت ورودی جوشکاری باعث افزایش دمای منطقه HAZ می شود، لذا، دانه ها در ناحیه های دانه درشت و دانه ریز زمان بیش تری برای رشد و ادغام مرز دانه های خود دارند [۹]. لذا، این امر باعث می گردد که با افزایش شدت جریان جوشکاری و افزایش حرارت ورودی جوشکاری میانگین قطر دانه ها در ناحیه های گوناگون HAZ افزایش یابد. از سوی دیگر، مقایسه شکل های ۷

<sup>1</sup> - Coarse Grain HAZ = CGHAZ

<sup>2</sup> - Fine Grain HAZ = FGHAZ

میانگین اندازه کاربیدهای  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  و  $\text{TiC}$  در شرایط جوشکاری پالسی کمتر از غیر پالسی است، به گونه ای که کمترین اندازه کاربیدهای  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  (۱/۷ میکرومتر) و کاربیدهای  $\text{TiC}$  (۳/۷ میکرومتر) مربوط به نمونه جوشکاری شده با شدت جریان ۹ آمپر در شرایط جوشکاری شده پالسی می باشد. در همین نمونه در ناحیه دانه ریز کمترین میانگین اندازه کاربیدهای  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  (۱/۶ میکرومتر) و کاربیدهای  $\text{TiC}$  (۳/۶ میکرومتر) در مقایسه با سایر نمونه ها بدست آمده است. علت این موضوع نیز به کمتر بودن میانگین حرارت ورودی جوشکاری پالسی نسبت به غیر پالسی مرتبط می باشد که باعث می گردد زمان نسبی خروج حرارت در حالت پالسی کمتر از حالت غیر پالسی باشد [۱۶]. لذا، فرصت کافی برای ادغام کاربیدهای موجود در ریزساختار در شرایط پالسی کمتر از غیر پالسی بوده که نتیجه آن، اندازه کوچک تر کاربیدها در ریزساختار ناحیه های دانه درشت و دانه ریز نمونه های پالسی بوده است.

#### ویژگی های مکانیکی و مقاومت الکتریکی ویژگی های مکانیکی (کشش و سختی)

جدول ۷ نتایج آزمون کشش و سختی نمونه های گوناگون را ارائه می دهد. همان گونه که از جدول ۷ مشخص است، محل شکست آزمون کشش در تمامی نمونه ها، فلز جوش می باشد. این موضوع مشخص می کند که استحکام کششی اتصال کمتر از فلز پایه بوده است، به گونه ای که در شرایط جوشکاری غیر پالسی بین ۲۰ تا ۳۰ درصد و در شرایط جوشکاری پالسی بین ۱۸ تا ۲۷ درصد استحکام کششی اتصال کمتر از فلز پایه بوده است. شکل ۸ الف و ب ارتباط بین استحکام کششی و سختی فلز جوش نمونه های گوناگون را بر حسب شدت جریان جوشکاری در شرایط غیر پالسی و پالسی نشان می دهد. همان گونه که از جدول ۷ و شکل ۸ الف و ب مشخص است، با افزایش شدت جریان جوشکاری از ۹ به ۱۱ آمپر در هر دو شرایط جوشکاری غیر پالسی و پالسی استحکام کششی و سختی فلز جوش کاهش نسبی یافته است، به گونه ای که کمترین استحکام کششی (۵۳۰ MPa) و سختی (۱۷۳ ویکرز) مربوط به فلز جوش نمونه

در یک شدت جریان جوشکاری ثابت میانگین قطر دانه های ناحیه دانه درشت و دانه ریز در شرایط جوشکاری پالسی کمتر از جوشکاری غیر پالسی است، به گونه ای که کمترین میانگین قطر دانه ها در ناحیه دانه درشت (۲۵ میکرومتر) و دانه ریز (۵ میکرومتر) مربوط به نمونه جوشکاری شده با شدت جریان ۹ آمپر در شرایط جوشکاری پالسی می باشد. علت این امر ناشی از پایین بودن میانگین حرارت ورودی جوشکاری پالسی نسبت به غیر پالسی است که باعث می شود که در یک شدت جریان ثابت جوشکاری ناحیه های گوناگون HAZ در نمونه جوشکاری پالسی از دمای بیشینه پایین تر و زمان کمتر برای رشد دانه ها در ناحیه های گوناگون برخوردار باشند [۱۴ و ۱۶]. لذا، میانگین قطر دانه های ناحیه های گوناگون HAZ در نمونه های جوشکاری شده پالسی با شدت جریان های برابر کمتر از نمونه های جوشکاری شده غیر پالسی می باشد.

جدول ۶ هم چنین، اندازه میانگین کاربیدهای  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  و  $\text{TiC}$  را در دو ناحیه دانه درشت و دانه ریز برای نمونه های گوناگون ارائه می دهد. همان گونه که از جدول ۶ مشخص است، میانگین اندازه کاربیدهای  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  و  $\text{TiC}$  در شرایط گوناگون جوشکاری تغییر نموده اند. بررسی جدول ۶ مشخص می کند که با افزایش شدت جریان جوشکاری از ۹ به ۱۱ آمپر در هر دو شرایط جوشکاری غیر پالسی و پالسی اندازه کاربیدهای  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  و  $\text{TiC}$  در هر دو ناحیه دانه درشت و دانه ریز افزایش یافته اند، به گونه ای که بیشترین میانگین اندازه کاربیدهای  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  در ناحیه دانه درشت (۴/۵ میکرومتر) و کاربیدهای تیتانیوم  $\text{TiC}$  (۵ میکرومتر) مربوط به منطقه HAZ نمونه جوشکاری شده با شدت جریان ۱۱ آمپر در شرایط غیر پالسی می باشد. بیشترین میانگین اندازه کاربیدهای  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  (۲/۳ میکرومتر) و کاربیدهای  $\text{TiC}$  (۴/۴ میکرومتر) در ناحیه دانه ریز مربوط به همین نمونه می باشد. بنظر می رسد علت این امر ناشی از زمان نسبی خروج حرارت طولانی تر، در شدت جریان های بالاتر و فرصت کافی برای ادغام کاربیدها در یکدیگر است [۹]. از سوی دیگر، بررسی جدول ۶ مشخص می کند که در یک شدت جریان ثابت جوشکاری،

در شرایط غیر پالسی است (جدول ۶)، لذا، مشاهده می‌شود که کمترین سختی در این دو ناحیه (دانه درشت = ۱۶۷ ویکرز و دانه ریز = ۱۷۵ ویکرز) مربوط به همین نمونه است. بررسی شکل ۹ مشخص می‌کند که در یک شدت جریان جوشکاری ثابت، استفاده از جوشکاری پالسی باعث کاهش مقادیر سختی ناحیه‌های دانه درشت و دانه ریز می‌گردد. علت این امر نیز با وضعیت دانه بندی و اندازه کاربیدهای این نواحی با حرارت ورودی در جوشکاری پالسی مرتبط است (که پیش‌تر توضیح داده شده است). لذا، مشاهده می‌گردد که بیش‌ترین سختی در این دو ناحیه (دانه درشت = ۱۸۱ ویکرز و دانه ریز = ۱۸۸ ویکرز) به نمونه جوشکاری شده با شدت جریان ۹ آمپر در شرایط پالسی مربوط است. از سوی دیگر، مقایسه شکل‌های ۹ الف و ب مشخص می‌کند که در یک شدت جریان جوشکاری ثابت در هر دو شرایط غیر پالسی و پالسی اصولاً سختی در ناحیه دانه درشت کمتر از سختی در ناحیه دانه ریز است. علت این موضوع ناشی از تفاوت در دانه بندی و اندازه رسوبات کاربیدی موجود در این دو ناحیه است (جدول ۶). ناحیه‌های دانه ریز به علت اندازه کوچکتر دانه‌ها و رسوبات کاربیدی بر اساس رابطه هال-پیچ از سختی بالاتری نسبت به ناحیه دانه درشت برخوردارند.

### مقاومت الکتریکی

جدول ۷ مقاومت الکتریکی (اتصال) فلز جوش نمونه‌های گوناگون را ارائه می‌دهد. شکل ۱۰ ارتباط بین مقاومت الکتریکی با شدت جریان جوشکاری را در شرایط غیر پالسی و پالسی نشان می‌دهد. بررسی جدول ۷ و شکل ۱۰ مشخص می‌کند که مقاومت الکتریکی اتصال رفتاری نامتعارف از خود نشان داده است. به گونه ای که بیش‌ترین مقاومت الکتریکی ( $3/9 \text{ m}\Omega$ ) در شرایط جوشکاری غیر پالسی مربوط به فلز جوش نمونه جوشکاری شده با شدت جریان ۹ آمپر است. در همین شرایط جوشکاری (جوشکاری غیر پالسی) مقاومت الکتریکی نمونه جوشکاری شده با شدت جریان ۱۰ آمپر،  $3/6 \text{ m}\Omega$  و نمونه جوشکاری شده با شدت جریان ۱۱ آمپر،  $3/8 \text{ m}\Omega$  بدست آمده است. این رفتار نامتعارف در نمونه‌های جوشکاری شده در شرایط پالسی نیز مشاهده

جوشکاری شده با شدت جریان ۱۱ آمپر در شرایط غیر پالسی می‌باشد. علت این امر مرتبط با ریزساختار میکروسکوپی فلز جوش است. همان‌گونه که پیش‌تر بیان شد (جدول ۵)، با افزایش شدت جریان جوشکاری، میانگین قطر دانه‌ها و میانگین اندازه کاربیدهای  $\text{TiC}$  و  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  در هر دو شرایط جوشکاری پالسی و غیر پالسی افزایش می‌یابند. لذا، بر اساس رابطه هال-پیچ<sup>۱</sup> [۹]، با افزایش میانگین اندازه قطر دانه‌ها و اندازه رسوبات (کاربیدی) استحکام کششی و سختی کاهش می‌یابد. بررسی جدول ۷ و شکل ۸ الف و ب مشخص می‌کند که در یک شدت جریان جوشکاری ثابت، استفاده از جوشکاری پالسی باعث افزایش استحکام کششی و سختی فلز جوش شده است. علت این امر ناشی از دانه بندی ریزتر و اندازه کوچک‌تر کاربیدهای  $\text{TiC}$  و  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  در نمونه‌های جوشکاری شده در شرایط پالسی می‌باشد که باعث افزایش استحکام کششی و سختی فلز جوش گردیده است. از آنجایی که کمترین میانگین قطر دانه‌ها و میانگین اندازه کاربیدهای  $\text{TiC}$  و  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  مربوط به نمونه جوشکاری شده با کمترین شدت جریان (۹ آمپر) در شرایط پالسی است (جدول ۵)، لذا، مشاهده می‌شود که بیش‌ترین استحکام کششی و سختی فلز جوش (به ترتیب  $610$  و  $185$  ویکرز) مربوط به این نمونه می‌باشد.

جدول ۷، سختی ناحیه‌های دانه درشت و دانه ریز منطقه HAZ را ارائه می‌دهد. شکل ۹ الف و ب ارتباط بین سختی ناحیه‌های دانه درشت و دانه ریز را با شدت جریان جوشکاری در دو شرایط جوشکاری غیر پالسی و پالسی، نشان می‌دهد. همان‌گونه که از جدول ۷ و شکل ۹ مشخص است، با افزایش شدت جریان جوشکاری در هر دو شرایط جوشکاری غیر پالسی و پالسی سختی ناحیه دانه درشت و دانه ریز کاهش می‌یابد. علت این امر ناشی از ارتباط بین میانگین اندازه قطر دانه‌ها و میانگین اندازه کاربیدهای  $\text{TiC}$  و  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  با حرارت ورودی جوشکاری (شدت جریان جوشکاری) و سختی می‌باشد. از آنجایی که بیش‌ترین میانگین قطر دانه‌ها و اندازه کاربیدهای  $\text{TiC}$  و  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  در هر دو ناحیه دانه درشت و دانه ریز، مربوط به نمونه جوشکاری شده با شدت جریان ۱۱ آمپر

<sup>1</sup> - Hull- Petch



پالسی و پالسی بیش‌تر از نمونه‌های جوشکاری شده با شدت جریان ۱۰ آمپر است.

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر شدت جریان جوشکاری در شرایط غیر پالسی و پالسی بر ریزساختار، ویژگی‌های مکانیکی (کشش و سختی) و مقاومت الکتریکی آلیاژ 80Ni-20Cr مورد بررسی قرار گرفته و نتایج زیر بدست آمد:

۱- ریز ساختار انجمادی تمامی نمونه‌ها از دانه‌های هم محور کروی و در مرز ذوب از سه منطقه (باریک) انجمادی صفحه‌ای، سلولی و دندریتی تشکیل شده بودند. با افزایش شدت جریان جوشکاری در شرایط غیر پالسی و پالسی، عرض مناطق رشد صفحه‌ای، سلولی و دندریتی افزایش یافتند.

۲- با افزایش شدت جریان جوشکاری در شرایط غیر پالسی و پالسی میانگین قطر دانه‌ها، میانگین اندازه کاربیدهای  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  و  $\text{TiC}$  فلز جوش افزایش یافتند. در یک شدت جریان جوشکاری ثابت میانگین اندازه‌های یاد شده در شرایط پالسی کمتر از جوشکاری غیر پالسی بدست آمد.

۳- منطقه HAZ تمامی نمونه‌ها از دو ناحیه دانه درشت و دانه ریز تشکیل شده بودند. در این منطقه با افزایش شدت جریان جوشکاری در شرایط غیر پالسی و پالسی میانگین قطر دانه‌ها، میانگین اندازه کاربیدها ( $\text{TiC}$  و  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ) و هم‌چنین، عرض ناحیه‌ها افزایش یافتند.

۴- با افزایش شدت جریان جوشکاری در شرایط غیر پالسی و پالسی استحکام کششی و سختی فلز جوش، سختی ناحیه‌های دانه درشت و دانه ریز (منطقه HAZ) کاهش یافتند. در یک شدت جریان جوشکاری ثابت مقادیر استحکام کششی و سختی فلز جوش و ناحیه‌های گوناگون HAZ در شرایط جوشکاری پالسی بیش‌تر از جوشکاری غیر پالسی بدست آمد.

۵- مقاومت الکتریکی فلز جوش نمونه‌های گوناگون تابعی از میانگین قطر دانه‌ها و چگونگی رسوب کاربیدها در مرز دانه‌ها بودند و مناسب‌ترین مقاومت الکتریکی

می‌شود به گونه‌ای که مقاومت الکتریکی نمونه جوشکاری شده با شدت جریان ۹ آمپر در شرایط پالسی برابر با  $4\text{ m}\Omega$  می‌باشد و مقاومت الکتریکی نمونه جوشکاری شده با شدت جریان ۱۰ آمپر،  $3/5\text{ m}\Omega$  و نمونه جوشکاری شده با شدت جریان ۱۱ آمپر  $3/9\text{ m}\Omega$  بدست آمده است. از آنجایی که مناسب‌ترین مقاومت الکتریکی مربوط به اتصالی است که کمترین اختلاف را با فلز پایه ( $3/4\text{ m}\Omega$ ) داشته باشد [۱ و ۲]، لذا، مناسب‌ترین اتصال از نظر مقاومت الکتریکی مربوط به نمونه جوشکاری شده با شدت جریان ۱۰ آمپر در شرایط پالسی می‌باشد.

تغییرات مقاومت الکتریکی را می‌توان با میانگین قطر دانه‌ها و چگونگی رسوب کاربیدها در ریزساختار و مرتبط دانست [۳ و ۱۷ و ۱۸]. در نمونه‌های جوشکاری با شدت جریان ۹ آمپر کوچک‌تر بودن اندازه دانه‌ها (جدول ۶) باعث افزایش مرزدانه‌ها می‌شود. از آنجایی که مرزدانه‌ها به عنوان موانع در مسیر هدایت الکتریکی بشمار می‌روند [۳]، لذا، مشاهده می‌گردد که بیش‌ترین مقاومت الکتریکی مربوط به نمونه‌های جوشکاری شده با شدت جریان ۹ آمپر در هر دو شرایط جوشکاری غیر پالسی و پالسی می‌باشد. به نظر می‌رسد که علت بالاتر بودن مقاومت الکتریکی در نمونه‌های جوشکاری با شدت جریان ۱۱ آمپر نسبت به نمونه‌های جوشکاری شده با شدت جریان ۱۰ آمپر ناشی از چگونگی رسوب کاربیدهای  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  و  $\text{TiC}$  در ریزساختار باشد. شکل ۱۱ تصویر میکروسکوپی نوری نمونه‌های جوشکاری شده با شدت جریان ۱۰ و ۱۱ آمپر را به صورت مقایسه‌ای در شرایط غیر پالسی نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل مشخص است، در نمونه جوشکاری شده با شدت جریان ۱۱ آمپر کاربیدهای کروم و تیتانیم به صورت تقریباً شبه پیوسته در مرزدانه‌ها قرار گرفته‌اند، ولی در نمونه جوشکاری شده با شدت جریان ۱۰ آمپر کاربیدهای کروم و تیتانیم به صورت ناپیوسته در مرزدانه‌ها قرار دارند. از آنجایی که ایجاد شبکه شبه پیوسته کاربیدها (با رسوبات) می‌تواند به عنوان سدی در برابر هدایت الکتریکی باشند [۳ و ۱۷ و ۱۸]، لذا، مشاهده می‌شود که مقاومت الکتریکی نمونه‌های جوشکاری شده با شدت جریان ۱۱ آمپر در هر دو شرایط جوشکاری غیر

### تشکر و قدردانی

این پژوهش با حمایت های مالی معاونت پژوهشی و فناوری دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج انجام شده است که از مسئولان محترم تشکر و قدردانی می گردد.

(کمترین اختلاف با فلز پایه) مربوط به نمونه جوشکاری شده با شدت جریان ۱۰ آمپر در شرایط پالسی با مقاومت الکتریکی  $3/5 \text{ m}\Omega$  بود.

### References

- 1- R.W. Waston " Heating Alloys " Metal's Handbook, Vol2 ,ASM , 2005, pp827-836.
- 2- R.W.Waston " Heating Alloys for Electrical Applications ", Kanthal Handbook, pp4-14, 2002.
- 3- A. Aql " Electrical Resistivity in Ni-Cr Alloys " Materials and Design, 24 , pp 547-550, 2003.
- 4- R. W. Waston, B.Jonsson, D.V.Cunningham, C.D. Starr" Electrical Resistance Alloys" Metal's Handbook , Vol 2 , ASM , pp 822-826, 2005.
- 5- W. Bettendge " Nickel and its Alloys " Science press , 2<sup>nd</sup> Edition , pp84-89, 2000 .
- 6- S. J. Patel" A Century of Discoveries , Inventors and New Nickel Alloys " JOM , Sep , pp 18-22, 2006.
- 7- E. W. Ross , C.T. Smith " Nickel Base Alloys " ASM International, 2<sup>nd</sup> Edition , , pp 97-133, 2007.
- 8- J. N. Dupont , J. C. Lippold , S. Kiser " Welding Metallurgy and Weldabiliy of Nickel Base Alloys " John Willry , pp 80-90, 2009.
- ۹- ح. ثابت " تکنولوژی و متالورژی جوشکاری " نشر امیر، ۱۳۷۶، صفحه ۲۳۰ تا ۲۳۲.
- 10- J.N. Dupont , R. J. Michael , D. B. Newbury " Welding Metallurgy of Alloy HR-60 " Welding Journal , 78 , 12, pp 408-414, 1999.
- ۱۱- ر. پهلوان، الف. حلویایی و ح، مقاره " تأثیر متغیرهای جوش مقاومتی فشاری بر ساختار متالورژیکی و استحکام

شکست آلیاژ حرارتی 80Ni-20Cr " دهمین کنفرانس ملی جوش و بازرسی ، ۱۳۸۸، تهران.

- 12- A. Halvae , R. Pahlavan , H. Moghareh " Effect of Resistance Welding Parameters on Metallurgical Structure of Heating Element Alloys " IIW International Congress on Welding and Joining , Iran, 2009.
- 13- A. Afkhami, A. Halvae " Study on Weldability of Ni-Cr Alloys by TIG Welding Process " International Congress on Advances in Welding Science and Technology for Construction Energy and Transportation System (AWS-2011), Antalya , Turkey, 2011.
- 14- S. Kou " Welding Metallurgy " 2<sup>nd</sup> Edition , A John Willey and Sons , INC Publication , pp 199-215, 2003.
- 15- C. V. Robino , J. R. Michael, M. J. Cieslak " Solidification and Welding Metallurgy of Thermo Alloys " Science and Technology of Welding and Joining , 2 , 5 , pp 220-230, 1997.
- 16- P. Praveen , P.K.D.V. Yarlagadda , M. J. Kang " Advancements in Pulse Welding " Journal of Materials Processing Technology , 164 , pp 1113-1119, 2005.
- 17- S. Vinyak , H. P. Vyas , V. D. Vankar " Microstructure and Electrical Characteristics of Ni-Cr-Thin Films " Thin Solid Films , 515 , 18 , pp 7109-7116, 2007.
- 18- S. Riken " Heating Materials " Pyromax Co Handbook , , pp1-20,2008.

### پیوست ها

جدول ۱- ترکیب شیمیایی (درصد وزنی) فلز پایه مورد استفاده در این پژوهش.

Cr	Fe	Si	Ti	Mn	C	S	P	Ni
۲۰/۲۱	۰/۱۱	۰/۱۲	۰/۲۶	۰/۱۱	۰/۲۵	۰/۰۱	۰/۰۱	باقی مانده

جدول ۲- شرایط جوشکاری نمونه‌های گوناگون.

نوع فرآیند	قوس میکروپلازما (MPAW)
روش جوشکاری	دستی
نوع جریان	DC
قطبیت جریان	DCRP
نوع الکترود	تنگستن + ۲ درصد اکسید توریم
شدت جریان	(آمپر) ۹، ۱۰، ۱۱ و ۹
نوع گاز محافظ	Ar+ 0.5%H <sub>2</sub>
قطر الکترود	میلیمتر ۱
فرکانس پالس	۵۰۰ HZ
شدت جریان در جریان پایین	(آمپر) ۵/۵، ۵ و ۴/۵ = شدت جریان ۵۰٪

جدول ۳- آنالیز EDS از ذرات موجود در ریز ساختار فلز پایه .

عنصر	درصد اتمی	فرمول شیمیایی
Ti	۵۶/۱۲	TiC
C	۴۳/۸۸	
Cr	۷۷/۸۱	Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>
C	۲۲/۱۹	

جدول ۴- عرض مناطق رشد صفحه ای، سلولی و دندریتی در مرز ذوب نمونه‌های گوناگون.

شرایط جوشکاری		عرض منطقه (μm)		
شدت جریان (A)	وضعیت پالس	صفحه ای	سلولی	دندریتی
۹	بدون پالس	۳	۴	۸
۱۰	بدون پالس	۴	۶	۱۰
۱۱	بدون پالس	۵	۸	۱۴
۹	پالسی	۲	۳	۶
۱۰	پالسی	۳	۵	۷
۱۱	پالسی	۴	۶	۱۰

جدول ۵- نتایج آزمون متالوگرافی فلز جوش نمونه‌های گوناگون.

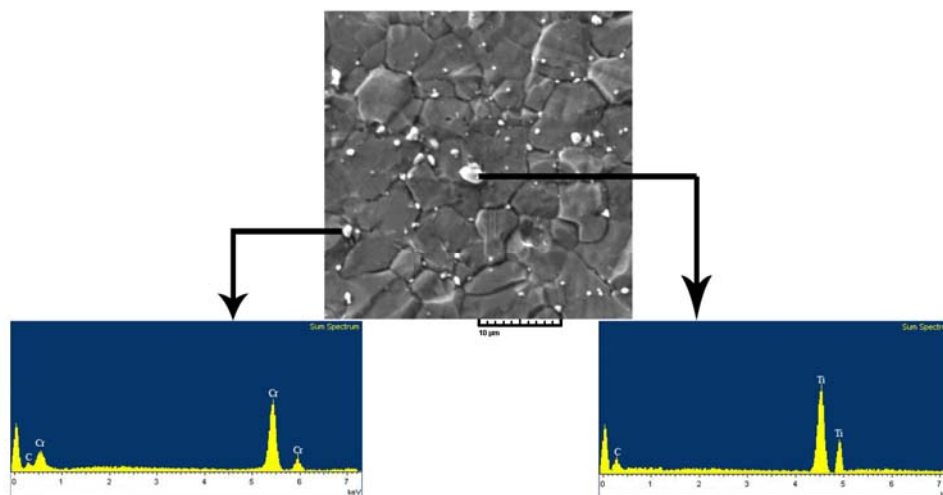
شرایط جوشکاری		درصد حجمی کاربیدها		میانگین قطر	اندازه میانگین کاربیدها (μm)	
شدت جریان (A)	وضعیت پالس	TiC	Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	دانه ها (μm)	TiC	Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>
۹	بدون پالس	۳	۲	۲۰	۴	۲
۱۰	بدون پالس	۳	۲	۳۰	۵	۲/۵
۱۱	بدون پالس	۳	۲	۳۵	۵/۵	۳/۵
۹	پالسی	۳	۲	۱۵	۳/۸	۱/۷
۱۰	پالسی	۳	۲	۲۵	۴/۳	۲/۱
۱۱	پالسی	۳	۲	۳۰	۴/۵	۳
فلز پایه		۳	۲	۸	۳/۵	۱/۵

جدول ۶- جزئیات ریزساختار منطقه HAZ نمونه های گوناگون.

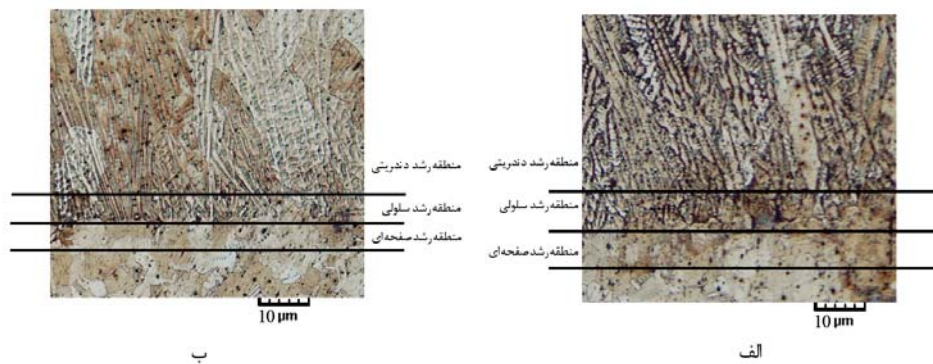
منطقه دانه ریز		منطقه دانه درشت				شرایط جوشکاری			
اندازه میانگین کاربیدها (μm)		میانگین قطر دانه ها (μm)	عرض منطقه (μm)	اندازه میانگین کاربیدها (μm)		میانگین قطر دانه ها (μm)	عرض منطقه (μm)	وضعیت پالس	شدت جریان (A)
TiC	Cr <sub>۲۳</sub> C <sub>۶</sub>			(TiC)	Cr <sub>۲۳</sub> C <sub>۶</sub>				
۳/۷	۱/۷	۵	۶۰	۴/۲	۱/۸	۳۰	۱۵۰	بدون پالس	۹
۴	۲	۶	۷۰	۴/۵	۲/۲	۴۰	۲۰۰	بدون پالس	۱۰
۴/۴	۲/۳	۷	۸۰	۵	۲/۵	۵۰	۲۵۰	بدون پالس	۱۱
۳/۶	۱/۶	۴	۵۰	۳/۷	۱/۷	۲۵	۱۰۰	پالسی	۹
۳/۸	۱/۸	۵	۶۰	۴	۲	۳۰	۱۵۰	پالسی	۱۰
۴/۲	۲/۱	۶	۷۰	۴/۳	۲/۲	۴۰	۲۰۰	پالسی	۱۱

جدول ۷- نتایج آزمون های مکانیکی و مقاومت الکتریکی نمونه های گوناگون.

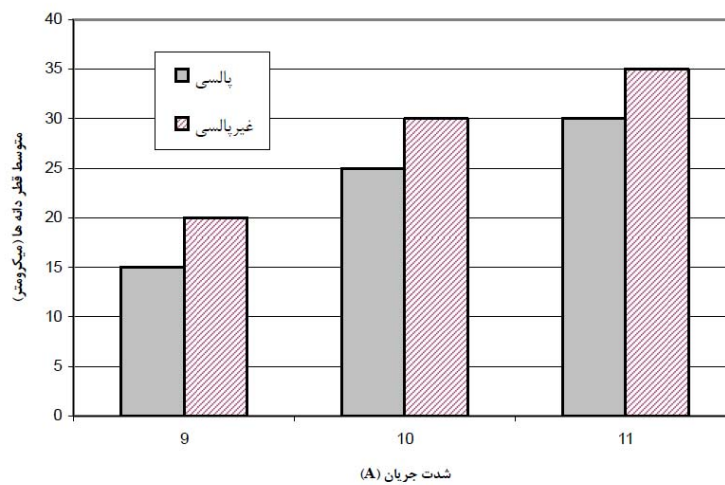
آزمون مقاومت الکتریکی (m.Ω)	آزمون سختی میکروسکوپی HV <sub>0.2</sub> منطقه HAZ			آزمون کشش		شرایط جوشکاری	
	دانه ریز	دانه درشت	فلز جوش	کششی (MPa)	محل شکست	وضعیت پالس	شدت جریان (A)
۳/۹	۱۸۴	۱۷۶	۱۸۰	۵۹۶	جوش	بدون پالس	۹
۳/۶	۱۸۰	۱۷۲	۱۷۶	۵۷۵	جوش	بدون پالس	۱۰
۳/۸	۱۷۵	۱۶۷	۱۷۳	۵۳۰	جوش	بدون پالس	۱۱
۴	۱۸۸	۱۸۱	۱۸۵	۶۱۰	جوش	پالسی	۹
۳/۵	۱۸۴	۱۷۶	۱۸۳	۵۸۳	جوش	پالسی	۱۰
۳/۹	۱۸۰	۱۷۱	۱۷۹	۵۴۵	جوش	پالسی	۱۱
۳/۴	۱۹۳			۷۵۰		فلز پایه	



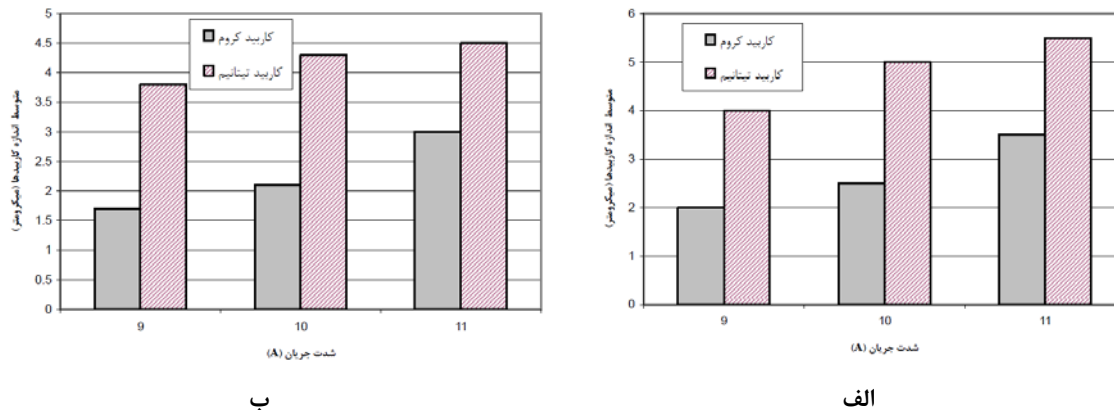
شکل ۱- تصویر SEM (SE) فلز پایه و آنالیز EDS از ذرات موجود در ریزساختار.



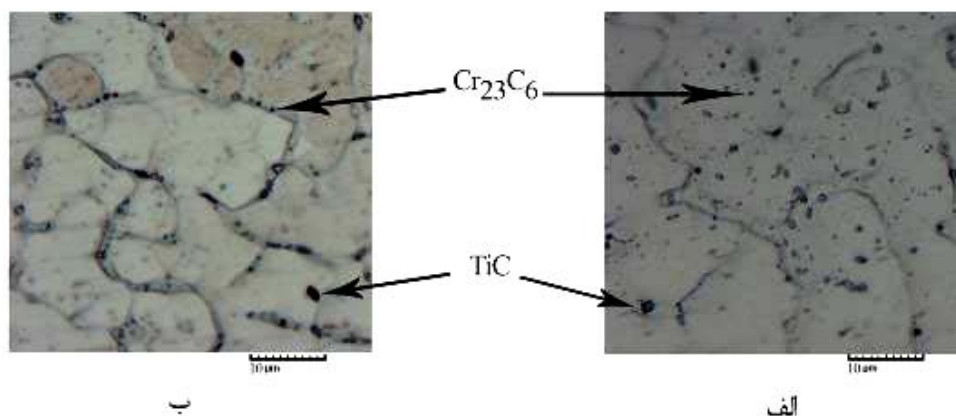
شکل ۲- ریزساختار میکروسکوپی مرز ذوب نمونه جوشکاری شده با شدت جریان ۹ آمپر.  
الف- غیر پالسی      ب- پالسی



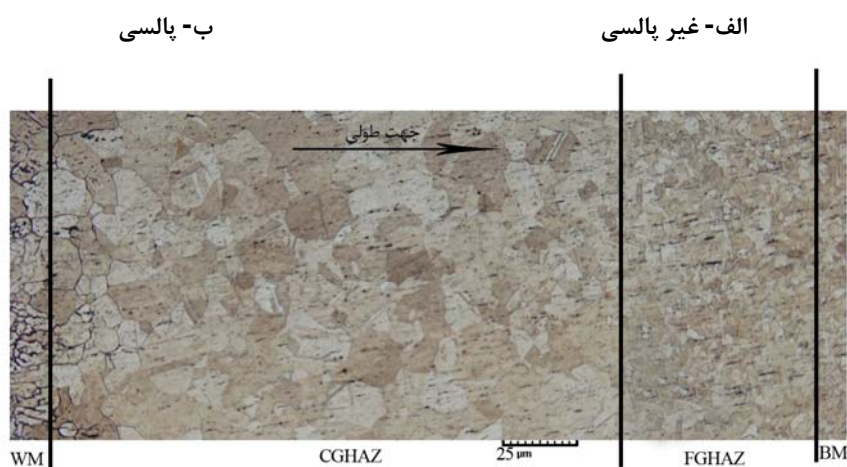
شکل ۳- ارتباط بین میانگین قطر دانه‌های فلز جوش بر حسب شدت جریان جوشکاری در شرایط غیر پالسی و پالسی.



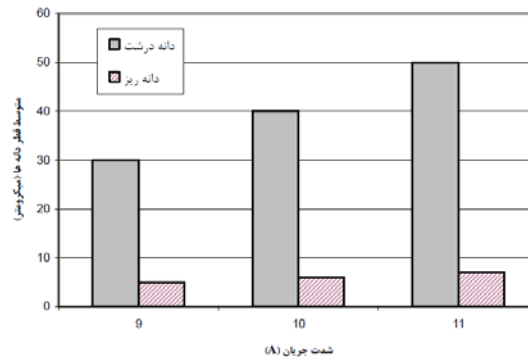
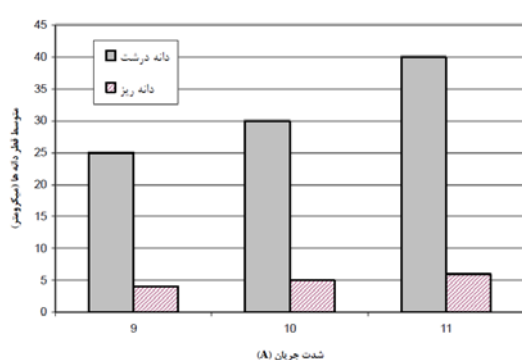
شکل ۴- ارتباط بین اندازه میانگین کاربیدهای  $Ti_3C_2$  و  $TiC$  بر حسب شدت جریان جوشکاری برای نمونه‌های گوناگون.  
الف- غیر پالسی      ب- پالسی



شکل ۵- تصویر میکروسکوپی نوری از کاربیدهای  $Cr_{23}C_6$  و  $TiC$  موجود در فلز جوش در شرایط جوشکاری با شدت جریان ۹ آمپر.



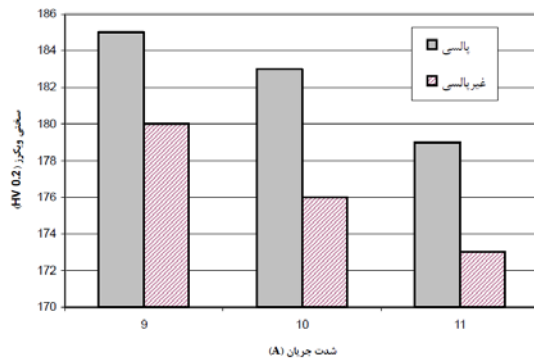
شکل ۶- تصویر میکروسکوپی نوری از منطقه HAZ نمونه جوشکاری شده با شدت جریان ۱۰ آمپر در شرایط غیر پالسی.



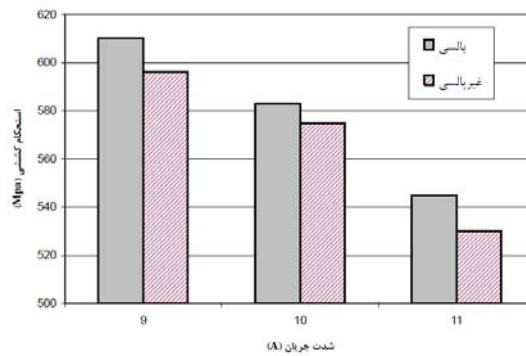
شکل ۷- ارتباط بین میانگین قطر دانه‌ها ناحیه دانه درشت و دانه ریز با شدت جریان جوشکاری برای نمونه‌های گوناگون.

ب- پالسی

الف- غیر پالسی

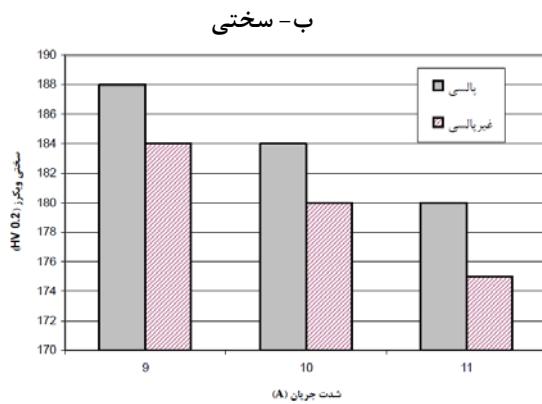


ب

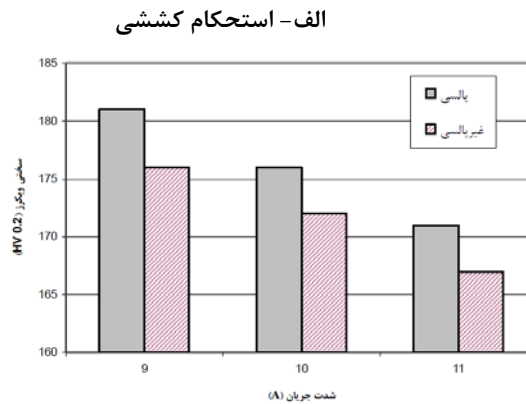


الف

شکل ۸- ارتباط بین استحکام کششی و سختی فلز جوش با شدت جریان جوشکاری برای نمونه‌های گوناگون در شرایط غیر بالسی و بالسی.

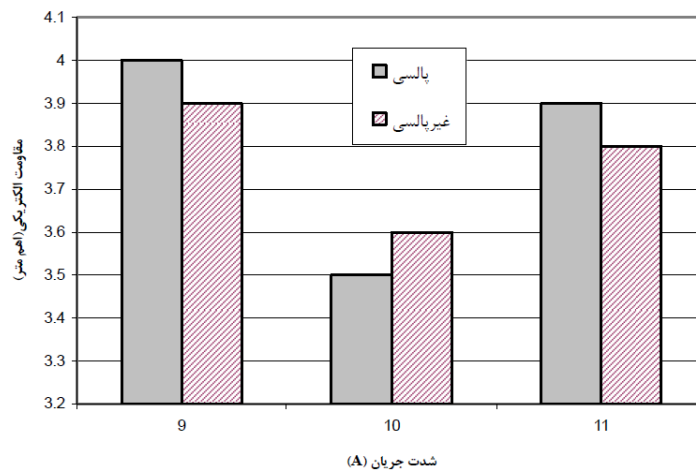


ب



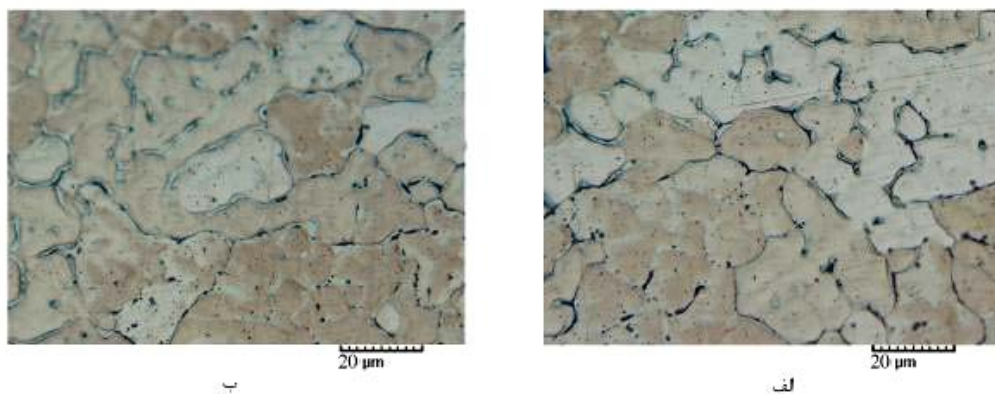
الف

شکل ۹- ارتباط بین سختی ناحیه‌های دانه درشت و دانه ریز با شدت جریان جوشکاری در شرایط غیر بالسی و بالسی.



شکل ۱۰-الف: HV 0.2 (kV) در برابر شدت جریان (A)

شکل ۱۰- ارتباط بین مقاومت الکتریکی فلز جوش با شدت جریان جوشکاری برای نمونه‌های گوناگون.



شکل ۱۱- تصویر میکروسکوپی نوری فلز جوش نمونه‌های جوشکاری شده در شرایط غیر پالسی.

ب- ۱۱ آمپر

الف- ۱۰ آمپر