

بررسی میکروساختاری و مکانیکی اتصال در سوپر آلیاژ پایه کبالت FSX۴۱۴ با لایه‌ی واسط پایه نیکل ایجاد شده به روش TLP

غلامرضا فغانی^{۱*}، محمدمین ظفروندی^۲

۱- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه پدافند هوایی خاتم الانبیاء(ص)، gffaghani@yahoo.com
 ۲- کارشناسی، دانشکده فرماندهی و کنترل، دانشگاه پدافند هوایی خاتم الانبیاء(ص)، mechaniccolledge@gmail.com
 *نویسنده مخاطب

چکیده

از دهه‌ی ۱۹۴۰، سوپر آلیاژها یکی از آن دستاوردهای جدیدی هستند که به دنبال اختراع ترکیبات آلیاژی و فرآیندهای تولید نوین، به وجود آمدند. خواص فیزیکی و مکانیکی مناسب در دماهای کاری بالا و توانایی ایجاد اتصال، عوامل مهم در انتخاب فرآیند اتصال می‌باشند. نوآوری مقاله حاضر، استفاده از لایه‌ی واسط پایه نیکل برای اتصال سوپر آلیاژ پایه کبالت بوده است. به منظور بررسی اثر تغییرات دما و زمان، دما از ۱۱۲۰ تا ۱۱۵۰ درجه سلسیوس و زمان از ۳۰ تا ۹۰ دقیقه تغییر کرده است. همچنین به منظور بررسی تأثیر اتمسفر موجود در محیط از دو اتمسفر آرگون با خلوص ۹۹/۹٪ و خلأ ۰/۰۰۰۱ تور استفاده شد. کار نوین دیگر در این پژوهش، عملیات حرارتی نمونه‌ها در دمای ۱۳۰۰ درجه سلسیوس بود که موجب از بین رفتن تنش باقی‌مانده گردید. در این مقاله، نمونه‌های تهیه شده در اتمسفر خلأ دارای ماکزیمم عمر خزشی ۸۵٪ از عمر خزشی فلز پایه‌ی بدون اتصال بودند و کمترین میزان عمر خزشی نیز مربوط به نمونه‌های اتصال داده شده در اتمسفر آرگون بوده که در حدود ۶۴٪ از عمر خزشی نمونه بدون اتصال را برقرار کردند. با توجه به بررسی‌های ریزساختاری بر روی نمونه‌های اتصال داده شده، دلیل عمر کمتر خزشی برای نمونه‌های اتصال داده شده، وجود یک سری فازهای ترد که عامل ایجاد و رشد ترک‌ها در خزش نمونه‌ها بودند، تحلیل شد. مهم‌ترین این فازها که منبع رشد ترک در ناحیه اتصال بود، ترکیب بین فلزی از عناصر آهن، نیکل و کربن $C_{0.19}Fe_{0.9}Ni_{0.11}$ بود.

واژه‌های کلیدی (نازنین ۱۰ پررنگ): سوپر آلیاژ- اتصال مایع گذرا- لایه واسط- انجماد هم‌دما- همگن‌سازی

۱- مقدمه

توسعه‌ی موازی تکنولوژی موتورهای جت، تقاضا برای آلیاژهای آستنیتی مستحکم‌تر را گسترش داد. تا آنجا که این‌گونه تصور شد، قدرت موتورهای جدید تا حد نامحدودی می‌تواند زیاد شود. از دهه‌ی ۱۹۴۰ و جنگ جهانی دوم، سوپر آلیاژها یکی از آن دستاوردهای جدیدی هستند که در طی اختراع ترکیبات آلیاژی و فرآیندهای تولید جدید، به وجود آمدند. توانایی تحمل بارگذاری در دماهای کاری نزدیک به دمای ذوب یکی از خصوصیات مهم آن‌ها می‌باشد. ضمن این‌که خصوصیت مهم دیگر این آلیاژها، مقاومت در برابر تخریب مکانیکی در طول زمان‌های زیاد سرویس‌دهی است. برای کاربردهای دمای بالا، بحث خزش را باید مدنظر داشت. در ارتباط با بقیه

مواد سازه‌ای، پارامترهای استاتیکی همچون نقطه تسلیم، استحکام نهایی و چقرمگی شکست نیز مهم هستند و این‌ها باید در طول زمان در حد دلخواه نگاه داشته شوند [۱]. وقتی که به مقاومت زیاد در برابر بارگذاری تحت شرایط استاتیک، خستگی و خزش نیاز باشد، سوپر آلیاژهای پایه کبالت به عنوان گزینه‌ای مناسب مطرح می‌شوند. این موضوع به‌ویژه در دماهای کاری بالای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد صادق می‌باشد [۲]. آلیاژهای پایه کبالت، از همان ابتدای تولید، در توربین‌های گازی و توربوشارژرها استفاده می‌شدند. آلیاژ X۴۰ برای اولین بار توسط شرکت جنرال الکتریک تولید و در توربوشارژرها به‌طور موفقیت‌آمیزی جایگزین سوپر آلیاژهای پایه نیکل شد. بعدها آلیاژ X۴۰ و سپس X۴۵ و FSX۴۱۴ آلیاژهای برتر در کاربردهای دانه‌های نازل توربین‌ها و موتورهای جت و هواپیماها شدند [۳]. فرایند اتصال فاز مایع گذرا، ترکیبی از فرایندهای اتصال لحیم‌کاری سخت و اتصال نفوذی است. مراحل ابتدایی این فرایند شبیه لحیم‌کاری سخت می‌باشد. یعنی فصل مشترک به‌وسیله‌ی یک مذاب ایجاد می‌شود، اما در نهایت ساختار محل اتصال، ساختاری شبیه با اتصال نفوذی خواهد داشت [۴]. در اتصال به‌روش فاز مایع، از یک لایه‌ی واسط نازک به‌عنوان عامل اتصال استفاده می‌شود. لایه‌ی واسط حاوی یک یا چند عنصر آلیاژی کاهنده‌ی نقطه‌ی ذوب است. پس از قرار دادن لایه‌ی واسط بین دو سطحی که باید به هم متصل شوند، این مجموعه‌ی ساندویچی تا دمای اتصال (کمی بالاتر از دمای عامل ذوب اتصال) گرم و در این دما نگه‌داشته می‌شود. در این دما به‌علت پایین‌تر بودن دمای ذوب لایه‌ی واسط نسبت به فلز پایه، اتصال ذوب شده و فاصله‌ی بین دو سطح با لایه‌ی نازکی از مذاب پر می‌شود. با نگهداری مجموعه در این دما، نفوذ متقابل بین فلز پایه و لایه واسط، باعث تغییر ترکیب شیمیایی فصل مشترک و در نتیجه انجماد هم‌دمای منطقه‌ی اتصال شده و یک اتصال دائمی ایجاد می‌گردد. نگهداری بیشتر مجموعه در دمای اتصال، موجب نفوذ متقابل آن‌ها در فصل مشترک و در نتیجه همگن شدن منطقه‌ی اتصال از نظر ترکیب شیمیایی و ریزساختار با فلز پایه می‌شود [۴]. مدل استاندارد فرایند اتصال فاز مایع گذرا به مراحل زیر تقسیم‌بندی شده است [۵-۷].

- مرحله‌ی اول: ذوب لایه واسط
- مرحله‌ی دوم: انحلال فلز پایه
- مرحله‌ی سوم: انجماد هم‌دما^۲
- مرحله‌ی چهارم: همگن شدن^۳

³ Homogenization

¹ Transient liquid phase
² Isothermal solidification

۲- روش تحقیق و کار تجربی

۱-۱- آلیاژ مورد استفاده

آلیاژ مورد استفاده در این مقاله، سوپر آلیاژ پایه کبالت FSX۴۱۴ می باشد. آنالیز شیمیایی به روش کوانتومتری در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی سوپر آلیاژ FSX۴۱۴

| نام عنصر | C | Cr | Ni | W | Fe | B | Co |
|-----------|------|------|------|---|----|------|-------|
| درصد وزنی | ۰,۳۵ | ۲۹,۵ | ۱۰,۵ | ۷ | ۱ | ۰,۰۱ | ۵۱,۶۴ |

لایه‌ی واسط مورد استفاده، پایه نیکل و با نام تجاری MBF-۸۰ و به صورت فویل‌های آمورف نازک با ضخامت ۲۵ میکرومتر تهیه شد. ترکیب شیمیایی لایه‌ی واسط در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- ترکیب شیمیایی لایه‌های واسط

| آلیاژ | ترکیب شیمیایی، درصد وزنی | | | | | | دماها | دانسیته (gr/cm ³) |
|--------|--------------------------|------|---|------|-------|------|-------|-------------------------------|
| | Cr | C | B | Ni | Solid | Liq | | |
| MBF-۸۰ | ۱۵,۲ | ۰,۰۶ | ۴ | ۸۰,۷ | ۱۰۴۸ | ۱۰۹۱ | ۱۱۲۱ | ۷,۹۴ |

۲-۲- عملیات حرارتی

تمامی نمونه‌های تهیه شده از آلیاژ FSX۴۱۴، جهت انجام عملیات حرارتی حل‌سازی و آنیل، به مدت یک ساعت در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد در اتمسفر خنثی تحت حرارت قرار گرفتند. به منظور حصول اطمینان از عدم وجود شرایط اکسیدی، در حین عملیات حرارتی، از اتمسفر آرگون ۹۹,۹ درصد با دبی ۲ لیتر در دقیقه استفاده شد. پس از انجام عملیات حرارتی، نمونه‌ها در آب سریع سرد شدند. پیش از انجام آزمون‌ها، لایه‌های اکسیدی ناشی از فرایند خنک‌کاری، توسط پولیش از دو سطوح نمونه حذف شدند.

۳-۲- آماده‌سازی نمونه‌ها و شرایط آزمون‌های میکروساختاری و مکانیکی

نمونه‌های خزشی به صورت دو استوانه با قطر ۵,۵ میلی‌متر و ارتفاع ۵۰ میلی‌متر تهیه شدند. این نمونه‌ها براساس استاندارد ASTM A۳۷۰ تهیه شدند. جنس فیکسچر موردنظر از آلیاژ فولاد زنگ‌نزن ۳۱۰S تهیه شد که قابلیت تحمل شرایط دمای بالای اتصال و عدم اکسید شدن و از دست دادن دقت ابعادی را دارا بود. نمونه‌های آماده‌سازی شده در شرایط مطابق با جدول ۳ مورد اتصال قرار گرفتند تا در نهایت بعد از انجام اتصال و عملیات حرارتی بعدی، موردنظر مورد استفاده قرار بگیرند.

جدول ۳- شرایط اتصال نمونه‌های FSX۴۱۴

| شماره اتصال | زمان اتصال (min) | دمای اتصال (°C) | همگن‌سازی نهایی |
|-------------|------------------|-----------------|--------------------|
| ۱ | ۱۰ | ۱۱۵۰ | ۳h در دمای ۱۳۰۰ °C |
| ۲ | ۱۵ | ۱۱۲۰ | ۳h در دمای ۱۲۲۵ °C |
| ۳ | ۱۵ | ۱۱۵۰ | - |

دلیل استفاده از شرایط انتخاب شده در جدول را می‌توان به این صورت توضیح داد که در نمونه‌های ۱ و ۳ تفاوت در عدم وجود مرحله‌ی همگن‌سازی در نمونه‌ی ۳ می‌باشد. مشاهده شد که نمونه‌ی ۳، از ناحیه‌ی اتصال حین برش و ایرکات جهت انجام مطالعات متالوگرافی و سختی‌سنجی از هم جدا شدند. در نمونه‌ی ۲ نیز به دلیل نزدیک بودن دمای اتصال به دمای نهایی

ذوب لایه‌ی واسط و همچنین کمتر بودن دمای اتصال و در نتیجه کمتر بودن میزان نفوذ، اتصال دارای تفاوت سختی در لایه‌ی واسط و زمینه بوده و همچنین در آنالیز خطی ترکیب شیمیایی SEM مشخص شد که مقدار زیادی از لایه واسط ترکیب خود را حفظ کرده و ترکیبی بین لایه واسط و زمینه صورت نگرفته است. در نهایت نمونه‌ی شماره ۱ که دارای شرایط مطلوب‌تری بود، جهت انجام سایر اتصالات انتخاب شد. نمونه‌ها از دمای اتاق درون کوره قرار می‌گرفتند و نرخ گرمایش نمونه‌ها با توجه به کارهای قبلی و البته با توجه به کوره‌ای که استفاده شد، تا دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد با نرخ گرمایش ۸ درجه بر دقیقه، و بعد از آن تا دمای اتصال‌دهی با نرخ گرمایش 5 درجه سانتیگراد بر دقیقه انتخاب شد. نرخ سرمایش نمونه‌ها نیز تا دمای اتاق کمتر از ۲۰ درجه سانتیگراد بر دقیقه بوده است.

جهت مطالعات میکروسکوپی ریزساختاری، ابتدا نمونه‌ها توسط مانت سرد، مانت شدند. سپس عملیات آماده‌سازی سطحی توسط سنباده‌زنی با سنباده‌های ۶۰۰، ۸۰۰، ۱۰۰۰، ۱۲۰۰ و ۱۵۰۰ و به دنبال آن توسط پولیش-کاری با محلول آلومینای ۰,۳ و ۰,۰۵ میکرون انجام شد. تصاویر متالوگرافی از نمونه‌های اتصال داده شده و از نواحی اتصال و فلز پایه بعد از مرحله‌ی پولیش و همچنین بعد از حکاکی سطح نمونه‌ها تهیه شدند. جهت بررسی‌های دقیق‌تر ریزساختاری، تهیه تصاویر با بزرگنمایی‌های بیشتر، بررسی ترکیب شیمیایی بخش‌های مختلف ریزساختاری در نمونه‌های اتصال یافته، از میکروسکوپ الکترونی روبشی و گا تسکان^۴ استفاده شد. همچنین بررسی‌های شکست‌نگاری از سطوح شکست نمونه‌های تنش-گسیختگی فلز پایه و همچنین نمونه‌های اتصال داده شده توسط میکروسکوپ الکترونی چول^۵ صورت پذیرفت.

جهت بررسی سختی اتصال ایجاد شده و همچنین مقایسه‌ی آن با فلز پایه و پیش‌بینی برخی خواص مکانیکی در ناحیه اتصال، از دستگاه سختی‌سنج میکرو ویکرز با استاندارد مرجع ASTM E ۳۸۴-۱۰ تحت نیروی ۳۰۰ گرم نیرو طی زمان ۱۰ ثانیه استفاده شد. جهت بررسی خواص مکانیکی دمای بالای آلیاژ اتصال داده شده، آزمون خزش انجام شد. جهت مقایسه خواص خزشی نمونه‌های اتصال داده شده با فلز پایه، بر روی فلز پایه نیز آزمون خزش انجام شد. جدول ۵، شرایط نمونه‌ها در آزمون خزش را نشان می‌دهد.

جدول ۵- شرایط تست خزشی آلیاژ FSX۴۱۴

| پارامتر | محدوده |
|------------|---------------|
| دمای آزمون | ۸۰۰-۸۱۵(°C) |
| تنش اعمالی | ۱۶۰ مگاپاسکال |
| طول عمر | حداقل ۳۰ ساعت |

پس از انجام آزمون خزش، بررسی‌های متالوگرافی انجام شدند که نتایج تست خزشی در بخش نتایج بررسی خواهند شد.

۳- نتایج و تحلیل

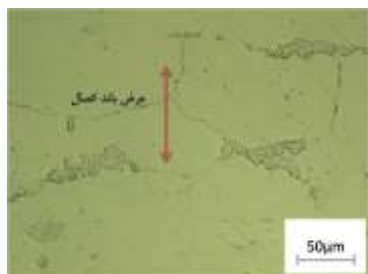
۱-۱- نتایج ریزساختاری اتصال در اتمسفر خلأ

نمونه‌های استوانه‌ای آماده شده برای اتصال در اتمسفر خلأ، در کوره‌ی تیوبی اتصال داده شدند. نرخ گرمایش کوره تا دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد ۸ درجه بر دقیقه و از دمای ۸۰۰ تا دمای اتصال ۸ درجه بر دقیقه در نظر

^۵ JEOL

^۴ VEGA II TESCAN

همان‌طور که در تصویر ۶ مشاهده می‌شود، ساختار فلز پایه به‌وسیله‌ی کاربیدهای اولیه M₆C پراکنده در ساختار پیوسته آستنیتی ۷ مستحکم شده است که در کاربردهای دمای بالا این کاربیدهای اولیه طی استحاله کاملاً به کاربیدهای ثانویه M₂₃C₆ تبدیل می‌شوند [۸]. این کاربیدها در ابعاد بسیار ریز (در حد کوچکتر از 1 میکرومتر) در نواحی کناری مرزهای دانه پراکنده شده‌اند و افزایش مقاومت ساختار در دمای بالا و جلوگیری از لغزش مرزانه‌ای در اثر کاهش استحکام ناشی از افزایش دما در حضور این رسوبات مستحکم گزارش شده است [۹]. براساس شکل ۷، ناحیه‌ی اتصال ایجاد شده به‌طور متوسط در تمامی نمونه‌های اتصال داده شده در شرایط خلأ، حدود ۶۵ میکرومتر اندازه‌گیری شده است. ناحیه‌ی اتصال ایجاد شده بدون هیچ‌گونه حفره و تخلخل و شامل ایجاد اتصال کامل بین دو فلز پایه بود. مشخص شد که مقادیر فازهای یوتکتیکی بسیار کمی در اطراف ناحیه اتصال باقی مانده است که این به‌دلیل بالا بودن زمان همگن‌سازی و همچنین بیشتر بودن زمان اتصال‌دهی از زمان پهنه بدست آورده شده می‌باشد. که اساساً در همان مرحله‌ی اولیه‌ی اتصال‌دهی در خلأ به‌دلیل زمان بالای نگهداری، و همچنین نرخ گرم و سرد شدن^۷ بسیار پائین، می‌توان مرحله همگن شدن را نیز دید که موجب بهبود ریزساختار نهایی خواهد شد. با توجه به شکل ۸ مشاهده می‌شود که ساختارهای یوتکتیکی در اطراف ناحیه‌ی اتصال در مناطق کوچک و به‌صورت غیر پیوسته قرار گرفته‌اند. موضوع بعد، ایجاد ساختار با دانه‌بندی ریز در محل اتصال و ناحیه‌ی اطراف باند اتصال می‌باشد. عدد اندازه دانه‌های ایجاد شده در اطراف ناحیه اتصال با قطر متوسط ۲۲٫۶ میکرومتر، براساس استاندارد ASTM حدود ۸ بود.



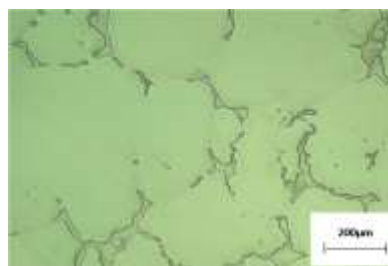
شکل ۷- ریز ساختار ناحیه‌ی اتصال در اتمسفر خلأ پس از اچ ماربل



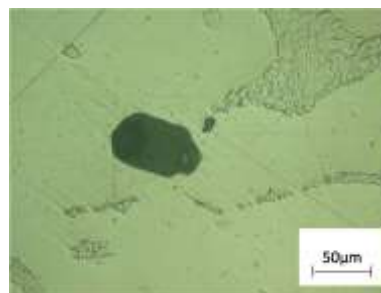
شکل ۸- ریز ساختار ناحیه اتصال در خلأ و ایجاد ساختار یوتکتیکی

جهت بررسی وجود فازهای با مقادیر بالای کروم و فازهای ذوب جزئی شده در ساختار، حکاکی ساختار محل اتصال به‌وسیله محلول موراکامی طبق جدول ۴ انجام شد و نتایج به‌صورت شکل‌های زیر می‌باشد.

گرفته شد تا کمترین تنش حرارتی در نمونه‌ها ایجاد شوند، نرخ سرمایش تا دمای محیط نیز کمی بیشتر از این مقدار در نظر گرفته شد. در این شرایط ایده‌آل‌ترین ساختار میکروسکوپی مشاهده شد. ریزساختار فلز پایه بعد از پولیش و همچنین ریزساختار محل اتصال بعد از پولیش و بدون اجرای پروسه حکاکی سطح فلز، نشان‌دهنده‌ی ساختار اتصالی مطلوب و بدون وجود حفرات در محل اتصال می‌باشد. در محل اتصال این نمونه‌ها تخلخل به مقدار بسیار کم مشاهده شد که در نهایت پس از بررسی با نرم‌افزار آنالیز تصویری کِلِمِکس^۶ حدود کمتر از ۳ درصد از سطح ناحیه اتصال داده شده، دارای تخلخل به‌دست آمد، که این میزان جهت آزمون خزشی نیز مطلوب بوده و تأثیر زیادی در نتایج به‌دست آمده نخواهد داشت. البته همین مقدار هم باعث کاهش خواص دمای بالای نمونه‌ها خواهد شد. در شکل ۴، ریزساختار فلز پایه، خارج از محل اتصال قبل از اچ کردن مشاهده می‌شود که در آن یک‌سری فاز ثانویه در کنار زمینه‌ی فلز ایجاد شده است. این فاز ثانویه در واقع همان کاربیدهای فلز پایه و عناصر آلیاژی می‌باشند. در شکل ۵ نیز ریز ساختاری از باند اتصال نمایش داده شده است که دارای یک تخلخل با ابعاد حدود ۵۰ میکرونی می‌باشد. پس از اچ کردن ساختار با محلول اچ ماربل، ریزساختار ناحیه‌ی اتصال به‌صورت شکل‌های ۶ و ۷ مشاهده می‌شود.



شکل ۴- ریزساختار فلز پایه بعد از اتصال تحت خلأ



شکل ۵- ریزساختار محل اتصال در اتمسفر خلأ



شکل ۶- ریزساختار فلز پایه پس از اچ ماربل

⁷ Heating & Cooling Rates

⁶ Clemex

میکرونی ناپیوسته در محل باند اتصال هستند که این امر به دلیل وجود ناخالصی‌های گاز محافظت‌کننده و همچنین عدم وجود فشارهای بالا بر روی محل اتصال بوده و موجب نفوذ به باند اتصال و تشکیل ناخالصی‌ها در اتصال شده است. بدیهی است که وجود این تخلخل‌ها در دماهای بالای کاری و همچنین در آزمون‌های بررسی استحکام در دمای بالای مانند خزش می‌توانند اثر منفی در نتایج حاصله را ایجاد کنند. با توجه به شکل‌های پس از حکاکی مانند شکل ۱۲ از ریزساختار محل اتصال، مشاهده می‌شود که در نزدیکی باند اتصال ساختارهای یوتکتیکی گاهی به‌طور پیوسته است.

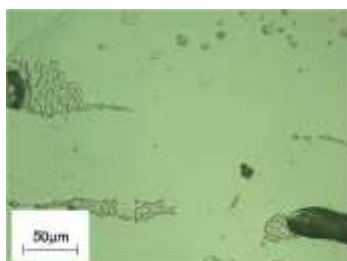


شکل ۱۲- ریزساختار محل اتصال در اتمسفر آرگون پس از اچ ماربل

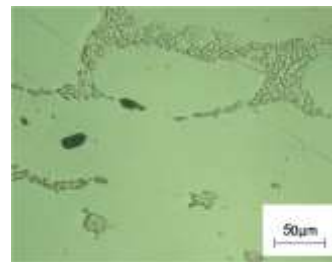
تخلخل‌های موجود در باند اتصال نیز قابل مشاهده می‌باشند. در این حالت عرض باند اتصال در نمونه‌های اتصال داده شده در اتمسفر آرگون در حدود ۱۰۰ میکرومتر اندازه‌گیری شد و همچنین اندازه دانه‌های ایجاد شده در اطراف ناحیه‌ی اتصال در حدود قطر متوسط ۳۳ میکرومتر بود که براساس استاندارد ۹۶-۱۱۲ ASTM دارای عدد اندازه دانه حدود ۷ بودند. در این حالت نیز پس از اچ موراکامی، فازهای با مقادیر بالای کروم در اطراف ناحیه‌ی اتصال که نسبت به حالت اتصال در اتمسفر خلأ دارای پیوستگی بیشتری می‌باشند، دیده شد. همچنین فازهای با ذوب جزئی مشاهده نشدند که دلیل این مورد هم همانند اتصال در شرایط خلأ به نرخ گرمایش و سرمایش نمونه‌ها و دادن زمان کافی به نمونه‌ها در دمای اتصال‌دهی و همگن‌سازی برای انجماد هم‌دما مربوط می‌باشد.



شکل ۱۳- ناحیه‌ی اتصال و محدودی متاثر از نفوذ در اتصال آرگون



شکل ۱۴- ریزساختار محل اتصال و ناحیه خارجی در آرگون پس از اچ

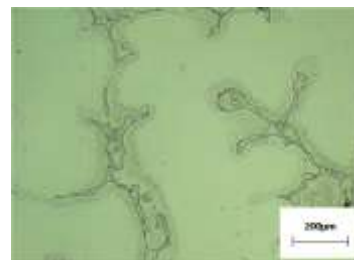


شکل ۹- ناحیه‌ی اتصال در اتمسفر خلأ پس از اچ موراکامی

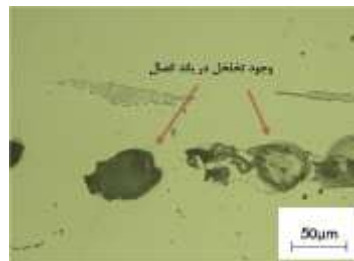
با توجه به شکل‌ها می‌توان گفت که فازهای با مقادیر بالای کروم در ناحیه اتصال هستند. این فازها همان ترکیبات کاربیدی غنی از کروم هستند. فازهای ذوب جزئی شده، پس از اچ با محلول موراکامی قابل دیدن نبود که البته به دلیل زمان‌های بیشتری که برای اتصال‌دهی و همچنین همگن‌سازی و نرخ‌های آرامتر گرمایش و سرمایش نمونه‌ها، قابل پیش بینی بود.

۲-۳- نتایج ریزساختاری اتصال در اتمسفر آرگون

نمونه‌های شرایط اتمسفر آرگون در کوره تیوبی^۸ با محافظت آرگون اتصال داده شدند. در این شرایط و پس از متالوگرافی نمونه‌ها، میزان تخلخل‌ها در محل اتصال بیشتر از حالت اتصال در اتمسفر خلأ مشاهده شد که دلیل این موضوع، وجود ناخالصی‌ها در اتمسفر آرگون محافظت‌کننده می‌باشد. بعد از بررسی، حدود ۸-۱۰ درصد از سطح محل اتصال در این نمونه‌ها، دارای تخلخل بود که به مراتب میزان بالاتری از حالت اتصال در اتمسفر خلأ می‌باشد. این امر بر روی استحکام دمای بالای نمونه‌ها هم تأثیر نامطلوبی داشت که با توجه به نتایج آزمون خزشی، مشخص شد که این نمونه‌ها دارای عمر خزشی پائین‌تر نسبت به نمونه‌های اتمسفر خنثی بودند.



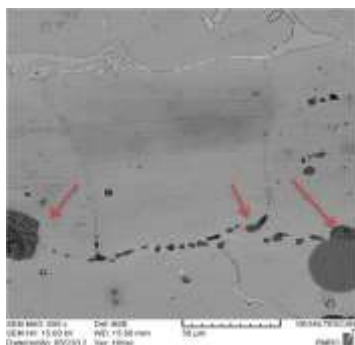
شکل ۱۰- ریزساختار فلز پایه در اتمسفر آرگون



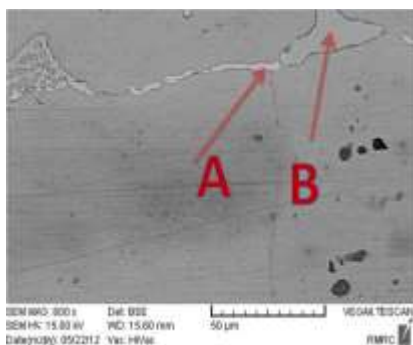
شکل ۱۱- ریزساختار محل اتصال در اتمسفر آرگون

براساس شکل ۱۱، ریزساختار در این حالت تفاوت چندانی با شرایط اتصال در اتمسفر خلأ نداشته و تقریباً دارای سختی و خواص مشابه با حالت اتصال در اتمسفر خلأ می‌باشد. در نتیجه می‌توان گفت که تقریباً تمامی نمونه‌های اتصال داده شده در اتمسفر آرگون، دارای این تخلخل‌های

⁸ Tube Furnace



شکل ۱۷- تصویر الکترون برگشتی از ناحیه‌ی اتصال و وجود تخلخل



شکل ۱۸- بررسی ترکیب شیمیایی فازهای اطراف ناحیه اتصال

در شکل ۱۸، دو ناحیه‌ی مجزا بر روی تصویر تعیین و ترکیب شیمیایی این دو ناحیه در ادامه در جدول‌های ۶ و ۷ ارائه شدند. در جدول ۶ ترکیب شیمیایی عناصر موجود در فاز نشان داده شده برحسب درصد وزنی ارائه شده است.

جدول ۶- ترکیب شیمیایی فاز مشخص شده A در ناحیه‌ی اتصال

| Elt | Line | Int | K | Kr | W% | A% |
|-----|------|-------|--------|--------|--------|--------|
| C | Ka | ۱۷,۴ | ۰,۰۱۹۱ | ۰,۰۱۷۲ | ۵,۶۹ | ۲۷,۳۵ |
| Cr | Ka | ۸۱۲,۳ | ۰,۵۳۶۵ | ۰,۴۸۴۰ | ۴۵,۹۸ | ۵۱,۰۸ |
| Co | Ka | ۷۵,۲ | ۰,۰۸۸۴ | ۰,۰۷۹۷ | ۷,۷۳ | ۷,۵۸ |
| Ni | Ka | ۱۵,۱ | ۰,۰۲۲۴ | ۰,۰۲۰۲ | ۱,۸۴ | ۱,۸۱ |
| W | La | ۴۳,۲ | ۰,۳۳۳۶ | ۰,۳۰۱۰ | ۳۸,۷۶ | ۱۲,۱۸ |
| | | | ۱,۰۰۰۰ | ۰,۹۰۲۱ | ۱۰۰,۰۰ | ۱۰۰,۰۰ |

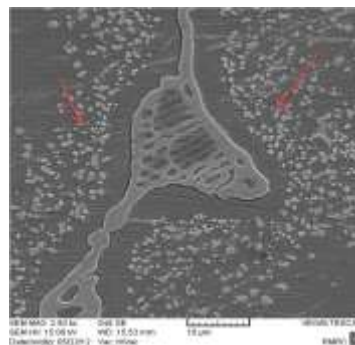
در جدول ۷ ترکیب شیمیایی عناصر موجود در فاز B برحسب درصد وزنی ارائه شده است.

جدول ۷- ترکیب شیمیایی فاز مشخص شده B در محل اتصال

| Elt | Line | Int | K | Kr | W% | A% |
|-----|------|-------|--------|--------|--------|--------|
| C | Ka | ۳۸,۲ | ۰,۰۳۹۷ | ۰,۰۳۴۵ | ۱۰,۸۹ | ۳۸,۹۰ |
| Cr | Ka | ۹۹۸,۱ | ۰,۶۲۲۷ | ۰,۵۴۱۷ | ۵۳,۷۶ | ۴۴,۳۴ |
| Fe | Ka | ۵,۲ | ۰,۰۰۴۶ | ۰,۰۰۴۰ | ۰,۴۲ | ۰,۳۲ |
| Co | Ka | ۱۴۰,۵ | ۰,۱۵۶۰ | ۰,۱۳۵۸ | ۱۴,۲۹ | ۱۰,۴۰ |
| Ni | Ka | ۲۰,۲ | ۰,۰۲۸۳ | ۰,۰۲۴۶ | ۲,۴۶ | ۱,۸۰ |
| W | La | ۲۰,۴ | ۰,۱۴۸۶ | ۰,۱۲۹۳ | ۱۸,۱۷ | ۴,۲۴ |
| | | | ۱۰۰,۰۰ | ۰,۸۷۰۰ | ۱۰۰,۰۰ | ۱۰۰,۰۰ |

۳-۳- نتایج ریزساختاری میکروسکوپ الکترونی روبشی

در این حالت ترکیب فازهای شکل گرفته در نزدیکی محل اتصال مورد بررسی قرار گرفتند که مشاهده شد فازهای شکل گرفته در محدوده باند اتصال دارای ترکیبی غنی از کاربیدهای کروم و تنگستن و به میزان کمی از ترکیبات دارای کبالت می‌باشند.



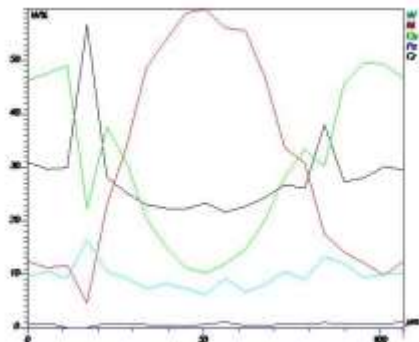
شکل ۱۵- ریزساختار ناحیه نزدیک باند اتصال در شرایط خلاء

در این حالت با توجه به شکل ۱۵ مشاهده شد که به خوبی کاربیدهای اولیه در نواحی اطراف دانه‌های موجود در محل اتصال پراکنده شده‌اند که در واقع رسوب سختی در آلیاژ در اثر حضور این فازهای کاربیدی در آلیاژ مورد بررسی و در نتیجه افزایش استحکام در دمای بالای کاربرد ایجاد شده است، که یکی از مکانیزم‌هایی است که به افزایش مقاومت خزشی در آلیاژ مورد مطالعه کمک می‌کند. طبق شکل ۱۶، ناحیه‌ی اتصال به خوبی شکل گرفته و مقداری از ترکیبات و فازهای یوتکتیکی و بین فلزی نیز در ناحیه‌ی اطراف محل اتصال در این تصویر قابل مشاهده است.



شکل ۱۶- ناحیه‌ی اتصال در نمونه‌ی اتصال داده شده در اتمسفر خلأ

تصویر الکترون‌های برگشتی از سطح نمونه، نشان‌دهنده وجود ریزتخلخل‌ها در اطراف ناحیه‌ی اتصال خواهد بود که در ادامه آورده شده است. این ریزتخلخل‌ها دارای ابعاد به نسبت کوچکتري در مقایسه با حالت اتصال در اتمسفر آرگون داشته و همچنین به‌ندرت در طول باند اتصال قابل مشاهده بودند که در شکل ۱۷، چند تخلخل با هم نشان داده شده‌اند. در ادامه، ترکیب شیمیایی فازهای موجود در ناحیه‌ی اتصال بررسی و درصد وزنی فازهای موجود در هر یک از نواحی به‌طور مجزا ارائه شده‌اند. همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، مشاهده گردید که این فازها دارای ترکیبات غنی از کروم و تنگستن و کبالت در کنار کربن می‌باشند که نشان‌دهنده وجود کاربیدهای این عناصر آلیاژی در ساختار می‌باشد.



شکل ۲۱- توزیع عناصر در ناحیه اتصال و فلز پایه اطراف اتصال در آرگون

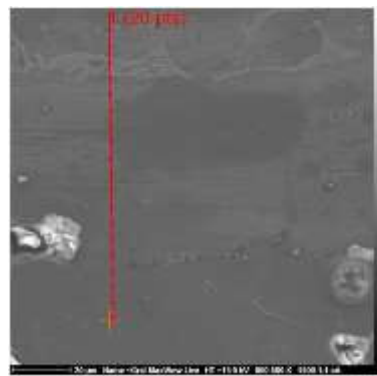
همانطور که مشاهده می‌شود، میزان کروم و تنگستن بیشتری در ناحیه‌ی اطراف محل اتصال نفوذ کرده و به‌صورت ترکیبات فلزی و کاربیدی تجمع کرده است که همین باعث افزایش فازهای موجود در ناحیه‌ی اطراف اتصال برای شرایط اتصال در اتمسفر محافظت آرگون شده و همچنین سختی نواحی محل اتصال و اطراف آن را در این حالت افزایش داده است و البته به‌دلیل ایجاد فازهای ترد و پیوسته بیشتر در ناحیه اتصال، می‌تواند اثر مخربی بر روی خواص خزشی و استحکامی دمای بالای آلیاژ داشته باشد.

۳-۴- نتایج آزمون‌های مکانیکی

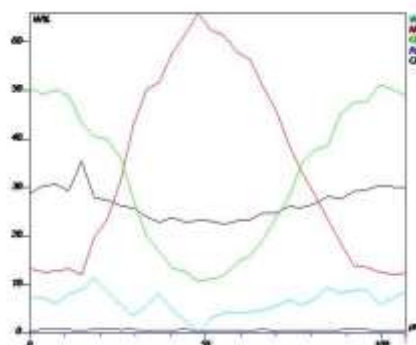
آزمون خزش بر روی نمونه‌های خزشی اتصال داده شده در اتمسفر خلأ و آرگون طبق استاندارد ارائه شده انجام شد. نمونه‌ها ابتدا به‌صورت استوانه‌ای با ابعاد ۲۵ میلی‌متر طول و ۵،۵ میلی‌متر قطر ماشین‌کاری و تهیه شدند. سپس به‌صورت دو به دو و به‌وسیله‌ی لایه‌ی واسط در همان شرایط اتصال موردنظر برای نمونه‌های متالوگرافی، تحت اتصال در هر دو اتمسفر خلأ و آرگون قرار گرفتند. در نهایت پس از انجام عملیات همگن‌سازی نهایی بر روی نمونه‌ها در اتمسفر آرگون، جهت ایجاد نمونه‌های خزشی ماشین‌کاری شدند. از هر اتصال سه نمونه‌ی استوانه‌ای ایجاد گردید. از این سه نمونه‌ی اتصال داده شده در اتمسفر خلأ در حین ماشین‌کاری، یکی از نمونه‌ها دچار شکست شد. دلیل این امر وارد کردن بار بالا حین عملیات ماشین‌کاری در نظر گرفته شد و نمونه‌های بعدی با دقت بالاتر و با اعمال بارهای کمتر مورد ماشین‌کاری و تهیه‌ی نمونه‌ی تست خزش قرار گرفتند. این نمونه‌ها سپس تحت دمای ۹۰۰ درجه و زمان ۲ ساعت در کوره با اتمسفر آرگون تحت عملیات حرارتی قرار گرفتند تا تنش‌های پسماند ناشی از ماشین‌کاری نمونه‌ها بر روی نتایج آزمون خزش تأثیرگذاری کمتری داشته باشد.

ابتدا جهت مقایسه، یک نمونه‌ی خزشی از فلز پایه تهیه شده و مورد آزمون خزش با شرایط ارائه شده در جدول ۳ قرار گرفت. این نمونه در زمان ۲۸ ساعت تحت بارگذاری موردنظر دچار شکست شد. دلیل این موضوع می‌تواند مربوط به فلز پایه‌ی تهیه شده از شرکت پرتو باشد، چرا که خواص استحکامی آلیاژ موردنظر کمتر از مقادیر پیش‌بینی شده به‌دست آمد. البته به‌دلیل مقایسه‌ای بودن تحقیق، می‌توان از این مورد چشم‌پوشی کرد، چرا که نمونه‌های اتصال داده شده که قرار است تحت خزش قرار گیرند، نیز دارای شرایط یکسانی بودند. نمونه‌های اتصال داده شده در اتمسفر خلأ در این شرایط تحت آزمون خزشی قرار گرفتند و شکست نهایی در این نمونه‌ها به‌ترتیب پس از ۲۴ و ۲۲،۵ ساعت ایجاد شد. که شکست خزشی در نمونه‌های اتصال داده شده دقیقاً از محل اتصال ایجاد شده رخ داد. همان‌طور

که در نتیجه، این فاز را ساختاری تردتر و با استحکام بالاتر می‌سازد. توجه به تصویر هم به‌دلیل روشن‌تر بودن این ناحیه می‌توان صحیح بودن نتیجه‌گیری مذکور را تأیید کرد. البته در نواحی اطراف ناحیه‌ی اتصال، مناطقی به‌صورت فاز B به‌مقدار بیشتری حضور داشتند. دلیل این امر نیز مقدار بیشتر کروم موجود در ساختار سوپر آلیاژ پایه و همچنین وجود کروم در ساختار لایه‌ی واسط مورد استفاده می‌باشد. در شکل ۱۹، بررسی تغییرات ترکیب شیمیایی در امتداد خط راست از نمونه‌های اتصال داده شده صورت گرفت تا بتوان نحوه‌ی توزیع عناصر موجود در لایه‌ی واسط و فلز پایه را در امتداد خط گذرنده از ناحیه اتصال که امتداد آن در دو فلز پایه می‌باشد، را مورد تحقیق قرار داد. در طول این آنالیز خطی، ۲۰ نقطه با فواصل برابر مورد بررسی ترکیب شیمیایی قرار گرفتند و در نهایت آنالیز خطی موردنظر به‌صورت داده‌های زیر ارائه شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، خط مورد آنالیز طوری قرار گرفته است که ناحیه‌ی اتصال را در نمونه‌های اتصال داده شده در اتمسفر خلأ، کاملاً پوشش داده و به‌طور کامل وارد هر دو ناحیه‌ی فلز پایه می‌شود. نمودار تغییرات درصد هر یک از عناصر آلیاژی موجود در فلز پایه و لایه‌ی واسط، به‌صورت شکل ۲۰ می‌باشد.



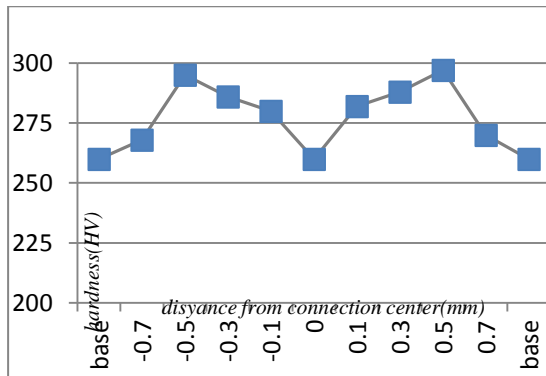
شکل ۱۹- ناحیه‌ی گذرنده از باند اتصال جهت آنالیز خطی



شکل ۲۰- توزیع عناصر آلیاژی در ناحیه‌ی اتصال و فلز پایه اطراف محل اتصال در اتمسفر خلأ

در نمونه‌های اتصال داده‌شده در اتمسفر آرگون نیز آنالیز خطی انجام گرفت و مشخص شد که تفاوت چندانی بین این دو نوع اتصال از لحاظ پراکندگی عناصر شیمیایی وجود ندارد. (شکل ۲۱)

مقادیر بالاتری از نمونه‌های اتصال داده شده در اتمسفر خلأ را نشان می‌دهند.



شکل ۲۳- پروفیل سختی نمونه‌های اتمسفر آرگون

۴- نتیجه‌گیری

خواص فیزیکی و مکانیکی مناسب در دماهای کاری بالا و توانایی ایجاد اتصال، عوامل مهم در انتخاب فرآیند اتصال می‌باشند. نوآوری مقاله حاضر، استفاده از لایه‌ی واسط پایه نیکل برای اتصال سوپر آلیاژ پایه کبالت بوده است. کار نوین دیگر در این پژوهش، عملیات حرارتی نمونه‌ها در دمای ۱۳۰۰ درجه سلسیوس بود که موجب از بین رفتن تنش باقی‌مانده گردید. با توجه به نتایج آزمون‌های میکروساختاری و مکانیکی، نتایج زیر بدست آمد؛

۱- با توجه به تصاویر تهیه شده از سطح نمونه‌های اتصال داده شده در اتمسفر خلأ و آرگون، مشاهده شد که باند اتصال به‌خوبی در نمونه‌های اتصال داده شده تحت خلأ ایجاد شده است و این نمونه‌ها دارای درصد‌های بسیار کمی (پایین‌تر از ۳٪ از سطح ناحیه اتصال داده‌شده) تخلخل در باند اتصال می‌باشند. در نمونه‌های اتصال داده‌شده تحت اتمسفر آرگون نیز نمونه‌ها به‌خوبی در اتمسفر آرگون با خلوص بالا اتصال داده شدند، با این تفاوت که درصد تخلخل‌های موجود در ناحیه‌ی اتصال بالاتر از حالت اتصال در خلأ بوده و حدود ۸ تا ۱۰٪ از سطح را در ناحیه‌ی اتصال در بر می‌گرفت که این موضوع باعث کاهش خواص مکانیکی ناحیه‌ی اتصال، به‌ویژه خواص دمای بالای آلیاژ خواهند شد.

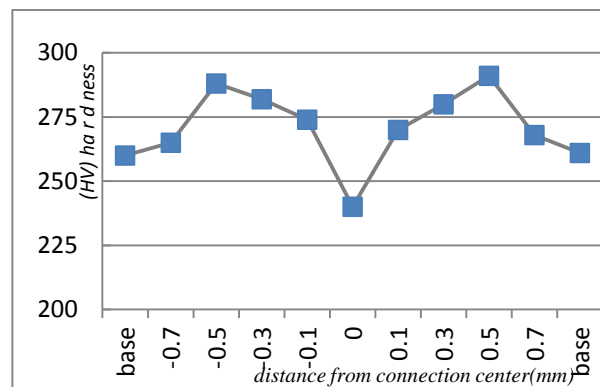
۲- ناحیه‌ی باند اتصال در اتصال‌دهی اتمسفر خلأ در حدود ۶۵ میکرون اندازه‌گیری شد که البته به‌دلیل نفوذ متقابل عناصر از لایه‌ی واسط به فلز پایه و همچنین عناصر فلز پایه به لایه‌ی میانی ذوب شده بوده است، در این‌حالت به‌دلیل زمان بالای قرارگیری در دمای اتصال‌دهی، فرصت کافی برای نفوذ عناصر بوده و همچنین عنصر بور که در واقع نقش کاهنده‌ی نقطه‌ی ذوب در لایه‌ی واسط را داشت، ضمن این‌که به‌خوبی نفوذ در فلز پایه را ایجاد کرده است.

۳- با توجه به آنالیز میکروسکوپ الکترونی از محل اتصال نمونه‌ها، مشاهده شد که یک‌سری فازهای با ترکیبات غنی از کروم و تنگستن و کربن در منطقه اتصال ایجاد شده‌اند. در واقع احتمالاً این فازها همان ترکیبات کاربیدی گزارش شده در سایر تحقیقات نیز می‌باشند.

۴- در مورد اندازه دانه‌های نهایی ایجاد شده در ساختار نواحی اطراف محل اتصال در نمونه‌های اتمسفر خلأ و آرگون، با توجه به این‌که در شرایط خلأ باند اتصال مقدار کمتری داشت، در نتیجه می‌توان گفت که در این‌حالت

که پیش‌تر اشاره شد، نمونه‌های استوانه‌ای طوری اتصال داده شده بودند که در نهایت مقطع اتصال داده شده، دقیقاً در میانه‌ی نمونه‌های تهیه شده برای آزمون‌های خزشی قرار گیرند. نمونه‌های اتصال داده شده در اتمسفر آرگون نیز پس از آماده‌سازی، جهت انجام آزمون‌های خزشی، تحت آزمون قرار گرفتند که در نهایت شکست در این نمونه‌ها، در زمان‌های ۱۹ ساعت و ۱۸ ساعت ایجاد شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نمونه‌های اتصال داده شده در شرایط اتمسفر آرگون دارای عمرهای خزشی به‌دست آمده‌ی کمتری نسبت به نمونه‌های اتصال داده شده در شرایط اتمسفر خلأ داشتند که به نظر می‌رسد دلیل این موضوع به شرایط ریزساختاری نمونه‌ها مربوط باشد، چرا که شرایط آماده‌سازی و شرایط آزمون نمونه‌ها کاملاً یکسان بوده است. به هر حال پس از انجام آزمون‌های خزشی مشاهده شد که نمونه‌های خزشی فلز پایه بدون اتصال رسیدند. که البته در بدترین حالت نیز میزان حدود ۶۴٪ از عمر خزشی به‌دست آمده از فلز پایه را دارا بودند.

البته این‌که نمونه‌های خزشی اتصال داده‌شده، همگی از ناحیه‌ی میانی که همان ناحیه اتصال بود، دچار شکست شدند، نشان‌دهنده وجود مشکل در اتصال ایجاد شده می‌باشد. این‌که فلز پایه‌ای که تحت آزمون خزشی بدون ایجاد اتصال قرار گرفت، از مقطعی خارج از ناحیه‌ی میانی نمونه دچار شکست شد، ناشی از وجود عیوب در نمونه‌های مورد تحقیق می‌باشد. جهت بررسی تغییرات سختی در نمونه‌های اتصال یافته، این نمونه‌ها جهت متالوگرافی (نمونه‌های مکعبی) را به‌وسیله برش و ایرکات دو نیمه کرده، یک بخش مانت شد و جهت بررسی‌های متالوگرافی مورد استفاده قرار گرفت. بخش دیگر نیز جهت بررسی سختی ساختار ایجاد شده، به‌کار گرفته شد. به این دلیل که نیاز به بررسی سختی در محل باند اتصال و همچنین ناحیه‌ی متأثر از نفوذ لایه‌ی واسط و همچنین فلز پایه بود، از روش میکرو-سختی‌سنجی ویکرز استاندارد ۳۸۴-۱۰ ASTM استفاده شد.



شکل ۲۲- پروفیل سختی نمونه‌های اتمسفر خلأ

براساس شکل ۲۲، سختی نمونه‌ها در محل اتصال به‌دلیل ایجاد ساختار با استحکام پایین‌تر بر پایه‌ی نیکل کاهش داشته و در ناحیه‌ی متأثر از نفوذ، به‌دلیل ایجاد ساختارهای یونکتیکی و همچنین یک‌سری فازهای بین‌فلزی بورایدی و کاربیدی دارای سختی بالاتری از فلز پایه می‌باشند. پروفیل سختی تهیه شده از سه نمونه‌ی اتصال‌یافته در اتمسفر آرگون به‌طور میانگین در شکل ۲۳ ارائه شده است. با توجه به شکل ۲۳، مشاهده می‌شود که سطوح سختی به‌دست آمده در نمونه‌های اتصال داده شده در اتمسفر آرگون،

رسیدن به سختی فلز پایه در فاصله‌ی حدود ۷۰۰ میکرونی از مرکز اتصال طی می‌کند. مقایسه‌ی نتایج نشان‌دهنده بالاتر بودن سختی مناطق اتصال و ناحیه‌ی اطراف اتصال در نمونه‌های اتمسفر آرگون نسبت به اتمسفر خلأ می‌باشد. البته این بالاتر بودن سطح مقادیر در حد ۵ تا ۱۰ ویکرز می‌باشد، که این میزان نیز به دلیل تغییر اتمسفر محافظت‌کننده موجود در محیط اتصال دهی است. چرا که سایر موارد کاملاً در انطباق کامل با یکدیگر بوده‌اند.

۵- مراجع

- [1] R. Reed, *The Super alloys*, Cambridge University Press, Cambridge, 2006.
- [2] W. F. Smith, *Structure and properties of engineering alloys*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1981.
- [3] C. T. Sims, W. C. Hagel, *The Super alloys*, John Wiley and Sons, New York, 1972.
- [4] M. G. Nicholas, *Joining processes, Introduction to brazing and diffusion bonding*, Dordrecht, The Netherlande, Kluwer, 1998.
- [5] D. S. Duvall, W.A. Owczarski, D.F. Paulonis, "TLP bonding: a new method for joining heat resistant alloys", *Welding Journal*, April 1974, Vol. 53, pp. 65-83.
- [6] I. Tuah-Poku, M. Dollar, T. B. Massalaski, "Study of transient liquid phase bonding process Applied to a Ag/Cu/Ag sandwich joint", *Metallurgical and Materials Transaction A*, 1998, Vol. 19A, pp. 575-576.
- [7] Y. Zhou, W. F. Gale, T. H. North, "Modeling of transient liquid phase bonding", *International Materials Reviews*, Vol. 40, 1992, pp. 181-196.
- [8] L. Zhang, "Analysis of concentration dependent interdiffusion coefficient during tlp bonding of copper with germanium powder", *Materials Science*, 2022, pp. 55-79.
- [9] A. I. Ghahferokhi, M. K. Asgarani, K. Amini, M. Rafiei, R. E. Kahrizangi, "Role of interlayer composition in microstructure and mechanical properties during TLP bonding of GTD-111/IN-718 superalloys", *Materials Science*, 2021, pp. 159-176.

مرحله‌ی ایجاد و شکل‌گیری دانه‌ها در ناحیه‌ی اطراف محل اتصال سریع‌تر ایجاد شدند. نکته‌ای که باعث عدم رشد بالای دانه‌ها در این ناحیه شد، به نظر می‌رسد، وجود ترکیبات فازی و بین فلزی غیر پیوسته در این ناحیه است که سبب قفل شدن مرزدانه‌های ایجاد شده و در نتیجه جلوگیری از رشد بیشتر آن‌ها شدند. تمامی نمونه‌های اتصال داده شده در اتمسفرهای خلأ و آرگون از ناحیه‌ی ضعیف‌تر یعنی از ناحیه‌ی اتصال و باند اطراف آن دچار شکست شدند.

۵- در داده‌های آزمون‌های خزش مشاهده شد که نمونه‌های اتصال داده شده نهایتاً از بخش اتصال دچار شکست خزشی شدند و تمامی نمونه‌های اتصال داده شده دارای عمر خزشی کمتری نسبت به نمونه‌ی بدون اتصال بودند. بهترین شرایط خزشی را نمونه‌ی اتصال داده شده تحت شرایط خلأ ایجاد کرد که زمان خزشی نهایتاً ۲۴ ساعت را تحت بار ثابت دوام آورد. که در حدود ۸۵٪ نمونه بدون اتصال تست شده از فلز پایه بود. و در کمترین حالت نیز نمونه‌ی اتصال داده شده در شرایط اتمسفر آرگون بود که تنها ۶۴٪ عمر خزشی فلز پایه را به دست آورد. دلیل این کاهش عمر خزشی نمونه‌های اتصال داده شده قطعاً به وجود عیوب و ناکامل بودن ساختار در ناحیه‌ی اتصال داده شده ارتباط داشت، چرا که تمامی نمونه‌های خزشی از ناحیه‌ی باند اتصال دچار شکست شدند. پس از بررسی‌های ریزساختاری، مشخص شد که در ناحیه‌ی اتصال این نمونه‌ها، وجود ترکیبات ترد و شکننده و هم‌چنین وجود تخلخل در ناحیه‌ی اتصال به شدت در کاهش عمر خزشی نمونه‌های اتصال داده شده تأثیرگذار بوده‌اند.

۶- با توجه به این که دانه‌های نمونه‌های اتصال داده شده نیز در ناحیه‌ی اتصال اندازه‌های کوچکی داشته‌اند، یعنی اندازه دانه‌ی ۸ برای نمونه‌های اتصال داده شده تحت خلأ و اندازه دانه‌ی بالای ۷ برای نمونه‌های اتصال داده شده تحت اتمسفر آرگون، این موضوع و تأثیر خزش مرزدانه‌ای به علت وجود سطح زیادی از مرزدانه‌ها به عنوان نقص برای نمونه‌های مورد آزمون، تأثیر بالایی در کاهش عمر خزشی نمونه‌ها داشت. احتمالاً انجام یک سری عملیات حرارتی دمای بالا جهت افزایش اندازه دانه‌های فلز در این نواحی می‌تواند نقش مؤثری در کاهش اثر این موضوع و در نتیجه افزایش عمر خزشی نمونه‌ها داشته باشد.

۷- سختی‌سنجی میکروویکرز از نمونه‌های اتصال داده شده، نشان‌دهنده وجود سطح سختی مطلوب در ناحیه‌ی اتصال ایجاد شده بود. وجود سختی نزدیک به فلز پایه در تمامی تحقیقات قبلی، نشان‌دهنده‌ی کامل بودن تمامی مراحل اتصال‌دهی نفوذی با لایه‌ی واسط است. هرچه زمان در مراحل اتصال‌دهی ناکافی باشد، فرصت نفوذ اتم‌ها و هم‌چنین عدم ایجاد ترکیبات بین فلزی و هم‌چنین ترکیبات یوتکتوئیدی کمتر ایجاد می‌شود. پس در نهایت سختی ناحیه‌ی اتصال بالاتری خواهیم داشت که قطعاً در خواص مکانیکی اتصال نیز تأثیرگذار خواهد بود. با توجه به پروفیل سختی‌های تهیه شده، هر دو نوع نمونه اتصال داده شده در شرایط اتمسفر خلأ و اتمسفر خنثی دارای سختی ناحیه‌ی اتصال مناسبی بوده و در هر دو نمونه، سختی ناحیه‌ی اطراف باند اتصال با فواصل حدود ۱۰۰ میکرون از مرکز اتصال دارای اندازه‌های سختی بالاتری می‌باشند. دلیل این موضوع نیز نفوذ عنصر کاهنده‌ی نقطه ذوب (بور) و هم‌چنین ریزدانه شدن آلیاژ در این ناحیه و هم‌چنین ایجاد ترکیبات یوتکتیکی در ناحیه‌ی اطراف اتصال می‌تواند باشد. این روند طی شدن سختی پس از رسیدن به یک مقدار بیشینه در حدود فاصله‌ی ۴۰۰ میکرون از مرکز اتصال، روند کاهشی را تا