

فهرست عناوین

صفحه	عنوان
	فصل اول: مقدمه
۲	۱-۱- سوپر آلیاژها:.....
۲	۲-۱- ریزساختار سوپرآلیاژهای پایه نیکل:.....
۳	۱-۲-۱- فاز زمینه γ :.....
۴	۲-۲-۱- فاز γ' :.....
۴	۳-۲-۱- کاربردها:.....
۵	۳-۱- ریزساختار سوپر آلیاژهای پایه کبالت:.....
۶	۱-۳-۱- فاز زمینه γ :.....
۶	۲-۳-۱- کاربردها:.....
۷	۴-۱- فرآیند اتصال سوپرآلیاژها:.....
۸	۵-۱- برخی از محدودیتها در روشهای اتصال سوپرآلیاژها:.....
۸	۱-۵-۱- جوشکاری ذوبی:.....
۸	۲-۵-۱- اتصال نفوذی:.....
۸	۳-۴-۱- لحیمکاری:.....

فصل دوم: آشنایی با روش اتصال حالت مایع گذرا (TLP)

۱۰	۱-۲- اتصال TLP:.....
۱۱	۲-۲- مراحل اتصال TLP:.....
۱۱	۱-۲-۲- مرحله حرارت دهی:.....
۱۲	۲-۲-۲- مرحله انحلال و گسترش:.....
۱۴	۳-۲-۲- مرحله انجماد همدمما:.....
۱۵	۴-۲-۲- مرحله همگن سازی:.....
۱۶	۳-۲- برخی و مزیتها و معایب اتصال TLP:.....
۱۶	۱-۳-۲- مزیتها:.....
۱۶	۲-۳-۲- معایب:.....

- ۱۷-۴-۲- اتصال TLP سوپرآلیاژ IN738:.....
- ۲۱-۵-۲- اتصال TLP سوپرآلیاژ FSX-414:.....
- ۲۵-۶-۲- مدلسازی فرآیند TLP:.....
- ۲۶-۱-۶-۲- روش های عددی شبیه سازی فرآیند TLP بطور یک بعدی:.....
- ۲۶-۱-۱-۶-۲- مدل میدان فازی:.....
- ۲۷-۲-۱-۶-۲- مدل مهاجرت فصل مشترک جامد/ مذاب:.....
- ۲۹-۳-۱-۶-۲- مقایسه مدل میدان فازی و مدل حرکت فصل مشترک:.....
- ۲۹-۲-۶-۲- مدل عددی دو بعدی اتصال TLP:.....

فصل سوم: مواد و روش ها

- ۳۴-۱-۳- مواد ، تجهیزات آزمایشگاهی و روشهای تحلیل:.....
- ۳۴-۱-۱-۳- مواد مورد استفاده:.....
- ۳۵-۲-۱-۳- تجهیزات آزمایشگاهی:.....
- ۳۶-۲-۳- آماده سازی و اتصال نمونهها:.....
- ۳۷-۳-۳- آزمایشات و بررسی های انجام شده بر روی اتصالات:.....
- ۳۷-۱-۳-۳- متالوگرافی و تصویر برداری توسط میکروسکوپ نوری و الکترونی:.....
- ۳۸-۲-۳-۳- سختی سنجی:.....
- ۳۸-۳-۳-۳- آزمایش تفرق اشعه X:.....
- ۳۸-۴-۳-۳- آنالیز تفکیک طول موج اشعه X (WDS):.....
- ۳۸-۵-۳-۳- آزمایش برش:.....
- ۳۹-۴-۳- شبیه سازی یک بعدی اتصال TLP ناهمگون:.....
- ۴۰-۱-۴-۳- معادلات ریاضی حاکم بر شبیه سازی:.....
- ۴۳-۲-۴-۳- الگوریتم برنامه:.....
- ۴۵-۳-۴-۳- داده های نفوذی:.....

فصل چهارم: بحث و نتایج

- ۴۸-۱-۴- بررسی ریزساختار ناحیه اتصال:.....
- ۵۰-۱-۱-۴- اتصال FSX-414/MBF-80/IN738 در دمای اتصال 1050°C :.....

۵۲	۴-۱-۲- اتصال FSX-414/MBF-80/IN738 در دمای اتصال °C ۱۱۰۰:
۵۵	۴-۱-۳- اتصال FSX-414/MBF-80/IN738 در دمای اتصال °C ۱۱۵۰:
۵۹	۴-۱-۴- اتصال FSX-414/MBF-80/IN738 در دمای اتصال °C ۱۲۰۰:
۶۴	۴-۲- استحکام برشی اتصالات:
۶۸	۴-۳- نتایج شبیه سازی یک بعدی اتصال TLP نامتشابه:
۶۸	۴-۳-۱- بررسی صحت عملکرد برنامه:
۷۰	۴-۳-۲- شبیه سازی اتصال:
۷۲	۴-۳-۱- اتصال FSX-414/MBF-80/FSX-414:
۷۴	۴-۳-۲- اتصال FSX-414/MBF-80/IN738:
۷۹	۴-۴- جمع بندی:
۸۱	مراجع

- شکل ۱-۱- تصویر شماتیک ریزساختار سوپرآلیاژهای پایه نیکل..... ۳
- شکل ۱-۲- ریزساختار سوپرآلیاژ پایه نیکل IN738 شامل کاربیدهای MC و فاز γ' ۵
- شکل ۱-۲- طرح شماتیک مرحله حرارت دهی (a) پروفیل دما (b) شماتیک دیاگرام فازی (c) پروفیل غلظتی اتصال (d) طرح شماتیک اتصال ۱۲
- شکل ۲-۲- طرح شماتیک مرحله انحلال و گسترش (a) پروفیل دما (b) شماتیک دیاگرام فازی (c) پروفیل غلظتی اتصال (d) طرح شماتیک اتصال..... ۱۳
- شکل ۳-۲- تصویر شماتیک مراحل انجماد همدمما در اتصال TLP (a) پروفیل دما (b) دیاگرام فازی (c) پروفیل غلظتی اتصال (d) طرح اتصال..... ۱۴
- شکل ۴-۲- تصویر شماتیک مرحله همگن سازی در اتصال TLP (a) پروفیل دما (b) شماتیک دیاگرام فازی (c) پروفیل غلظتی اتصال (d) طرح شماتیک اتصال..... ۱۵
- شکل ۵-۲- تصویر اتصال TLP سوپر آلیاژ پایه نیکل در دمای 1100°C و زمان نگهداری ۳۰ دقیقه..... ۱۸
- شکل ۶-۲- ریزساختار اتصال TLP آلیاژ IN738 در دمای 1190°C و زمان نگهداری ۲۹۰ دقیقه..... ۱۹
- شکل ۷-۲- سطح شکست نمونههای اتصال TLP سوپرآلیاژ IN737 (الف) آلیاژ پایه (ب) اتصال در دمای 1200°C و زمان نگهداری ۱ ساعت (ج) اتصال در دمای 1200°C و زمان نگهداری ۳ ساعت (د) اتصال در دمای 1150°C و زمان نگهداری ۵ دقیقه (و) اتصال در دمای 1500°C و زمان نگهداری ۹۰ دقیقه (ه) اتصال در دمای 11500°C و زمان نگهداری ۶ ساعت ۲۰
- شکل ۸-۲- ریزساختار اتصال TLP سوپر آلیاژ FSX-414 در دمای 1150°C و زمان نگهداری ۵ دقیقه..... ۲۲
- شکل ۹-۲- ریزساختار اتصال TLP سوپر آلیاژ FSX-414 در دمای 1200°C و زمان نگهداری ۵ دقیقه..... ۲۳
- شکل ۱۰-۲- تصویر سطح شکست اتصال TLP سوپرآلیاژ FSX-414 (الف) دمای اتصال 1050°C و زمان نگهداری ۲۰ دقیقه (ب) دمای اتصال 1100°C و زمان نگهداری ۱۰ دقیقه (ج) دمای اتصال 1150°C و زمان نگهداری ۵ دقیقه (د) دمای اتصال 1200°C و زمان نگهداری ۱۲۰ دقیقه ۲۵
- شکل ۱۱-۲- تغییرات یک بعدی غلظت در یک اتصال TLP ۲۸
- شکل ۱۲-۲- نمایش شماتیک مسئله دو بعدی اتصال TLP ۳۰
- شکل ۱-۳- (الف) نمای کلی کوره تحت خلاء (ب) تصویر محفظه قرار گیری نمونه ها در کوره ۳۶
- شکل ۲-۳- میکروسکوپ الکترونی مورد استفاده در این تحقیق..... ۳۷
- شکل ۳-۳- تصویر شماتیک نگهدارنده در آزمایش برش ۳۹
- شکل ۴-۳- تصویر شماتیک یک بعدی اتصال TLP ناهمگون..... ۴۰
- شکل ۵-۳- فلوجارت برنامه شبیهساری فرآیند اتصال TLP ناهمگون..... ۴۴

شکل ۴-۱- تصویر ریز ساختار اتصال FSX-414/MBF-80/IN738 در دمای اتصال °C ۱۰۵۰ و زمان نگهداری ۱ دقیقه ۴۹

شکل ۴-۲- تصویر میکروسکوپی اتصال FSX-414/MBF-80/IN738 در دمای اتصال °C ۱۰۵۰ (الف) زمان اتصال ۱ دقیقه (ب) مدت اتصال ۱۰ دقیقه ۵۰

شکل ۴-۳- تغییرات سختی در اتصال FSX-414/MBF-80/ IN738 در دمای اتصال °C ۱۰۵۰ ۵۱

شکل ۴-۴- تصویر میکروسکوپی اتصال FSX-414/MBF-80/IN738 در دمای اتصال °C ۱۱۰۰ (الف) زمان اتصال ۱ دقیقه (ب) زمان اتصال ۵ دقیقه ۵۳

شکل ۴-۵- تغییرات سختی در اتصال FSX-414/MBF-80/IN738 در دمای °C ۱۱۰۰ ۵۴

شکل ۴-۶- تصویر میکروسکوپی اتصال FSX-414/MBF-80/IN738 در دمای اتصال °C ۱۱۵۰ (الف) زمان اتصال ۱ دقیقه (ب) مدت اتصال ۵ دقیقه ۵۵

شکل ۴-۷- تصویر میکروسکوپ الکترونی منطقه اتصال نمونه FSX-414/MBF-80/IN738 در دمای °C ۱۱۵۰ و زمان اتصال ۵ دقیقه ۵۷

شکل ۴-۸- تغییرات سختی در اتصال FSX-414/MBF-80/IN738 در دمای °C ۱۱۵۰ ۵۸

شکل ۴-۹- آنالیز خطی WDS اتصال FSX-414/MBF-80/IN738 در دمای °C ۱۱۵۰ به مدت ۱ دقیقه ۵۸

شکل ۴-۱۰- آنالیز خطی WDS اتصال FSX-414/MBF-80/IN738 در دمای °C ۱۱۵۰ به مدت ۵ دقیقه ۵۹

شکل ۴-۱۱- تصویر میکروسکوپی اتصال FSX-414/MBF-80/IN738 در دمای اتصال °C ۱۲۰۰ به مدت ۱۰ دقیقه ۶۰

شکل ۴-۱۲- ریزساختار ترکیبات یوتکتیکی در اتصال FSX-414/MBF-80/IN738 (الف) دمای اتصال °C ۱۰۵۰ و زمان نگهداری ۱ دقیقه (ب) دمای اتصال °C ۱۲۰۰ و زمان نگهداری ۱۰ دقیقه ۶۱

شکل ۴-۱۳- آنالیز خطی WDS اتصال FSX-414/MBF-80/IN738 در دمای °C ۱۲۰۰ به مدت ۱۰ دقیقه ۶۲

شکل ۴-۱۴- تغییرات حداکثر سختی مناطق DAZ در نیمه اتصال IN738 و FSX-414 و متوسط سختی در لایه واسط MBF-80 با تغییرات دما ۶۳

شکل ۴-۱۵- تغییرات استحکام برشی با تغییر دمای اتصال در اتصالات FSX-414/MBF-80/ IN738 ۶۳

شکل ۴-۱۶- تصویر مقطع شکست در اتصال FSX-414/MBF-80/IN738 (الف) اتصال در دمای °C ۱۱۰۰ و زمان نگهداری ۱۰ دقیقه (ب) اتصال در دمای °C ۱۱۵۰ و زمان نگهداری ۱۰ دقیقه (ج) اتصال در دمای °C ۱۲۰۰ و زمان نگهداری ۱۰ دقیقه ۶۵

شکل ۴-۱۷- تصویر میکروسکوپ الکترونی سطح شکست در اتصال FSX-414/MBF-80/IN738 (الف) اتصال در دمای °C ۱۱۰۰ با زمان نگهداری ۱ دقیقه (ب) اتصال در دمای °C ۱۱۰۰ با زمان نگهداری ۱۰ دقیقه (ج) اتصال در دمای °C ۱۲۰۰ با زمان نگهداری ۱۰ دقیقه ۶۷

- شکل ۴-۱۸- نتایج آزمایش XRD اتصال FSX-414/MBF-80/IN738 در دمای اتصال 1050°C و زمان نگهداری ۱ دقیقه..... ۶۸
- شکل ۴-۱۹- شبیه سازی اتصال TLP آلیاژ IN738 به آلیاژ CMSX-4 ۶۹
- شکل ۴-۲۰- مقایسه نتایج تحقیق حاضر با نتایج شبیه سازی و تجربی سایر محققین ۷۰
- شکل ۴-۲۱- ارتباط بین مجذور زمان نگهداری و عرض متوسط یوتکتیک ۷۱
- شکل ۴-۲۲- نمودار $\ln m- 1/T$ ۷۲
- شکل ۴-۲۳- نتایج شبیه سازی اتصال FSX-414/MBF-80/FSX-414 ۷۳
- شکل ۴-۲۴- زمان انجماد همدمما در اتصال همگون FSX-414/MBF-80/FSX-414 ۷۳
- شکل ۴-۲۵- ریزساختار حاصل از اتصال FSX-414/MBF-80/FSX-414 در دمای 1050°C به مدت ۱۰ دقیقه ۷۴
- شکل ۴-۲۶- ریز ساختار اتصال TLP، FSX-414/MBF-80/IN738، در دمای 1050°C برای مدت ۱۰ دقیقه ۷۵
- شکل ۴-۲۷- شبیه سازی اتصال TLP، FSX414/MBF-80/IN738، در دمای 1050°C ۷۶
- شکل ۴-۲۸- نتایج شبیه سازی اتصال TLP، FSX-414/MBF-80/ IN738، در دمای 1100°C ۷۶
- شکل ۴-۲۹- نتایج شبیه سازی اتصال TLP، FSX-414/MBF-80/IN738، در دمای 1150°C ۷۷
- شکل ۴-۳۰- مقایسه نتایج تجربی و شبیه سازی برای اتصال FSX-414/MBF-80/IN738 (الف) نسبت فاصله محل تلاقی فصل مشترک ها دونیمه اتصال (ب) زمان کامل شدن انجماد همدمما ۷۷
- شکل ۴-۳۱- سرعت حرکت فصل مشترک ها در اتصال FSX-414/MBF-80/IN738 (الف) نیمه FSX-414 (ب) نیمه IN738 ۷۸

فهرست جداول

صفحه	عنوان
۳۴.....	جدول ۱-۳ ترکیب شیمیایی آلیاژهای به کار رفته در اتصال TLP.....
۳۵.....	جدول ۲-۳- برخی تجهیزات آزمایشگاهی استفاده شده در این تحقیق.....
۳۷.....	جدول ۳-۳- دمای و زمان استفاده شده برای اتصال FSX-414/MBF-80/ IN738.....
۴۲.....	جدول ۴-۳- تعریف پارامترهای به کار رفته در معادلات.....
۴۶.....	جدول ۵-۳- دمای و زمان استفاده شده برای اتصال FSX-414/MBF-80/FSX-414.....
۵۷.....	جدول ۱-۴ طول منطقه تحت تاثیر نفوذ در اتصالات FSX-414/MBF-80/IN738.....
۷۱.....	جدول ۲-۴ عرض متوسط لایه یوتکتیک در اتصالات FSX-414/MBF-80/FSX-414.....

پیشگفتار

سوپرآلیاژها بطور گسترده‌ای در شرایط دمایی بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند، استحکام کششی مناسب در دمای بالا، مقاومت به خزش، اکسیداسیون و خوردگی و پایداری زیرساختاری در دمای بالا موجب شده است که بسیاری از اجزاء مهم توربین‌های بخار، فضاپیما و ژنراتورهای تولید نیرو از این آلیاژها ساخته شوند. به طور کلی سوپرآلیاژها به سه دسته سوپر آلیاژهای پایه نیکل، سوپر آلیاژهای پایه کبالت و سوپر آلیاژهای پایه آهن تقسیم می‌شوند. سوپرآلیاژهای نیکل و کبالت کاربردهای بسیار زیادی در توربین‌های بخار و موتور فضاپیماها دارند.

قطعات ساخته شده از سوپرآلیاژها در اغلب در شرایط کاری دمای بالا قرار دارند بنابراین تحت خزش، تنش‌های حرارتی، اکسیداسیون و خوردگی قرار دارند. بنابراین این قطعات در معرض آسیب‌های خزش، ترک‌های خستگی حرارتی و جدایش سطحی قرار دارند. تعمیر این آسیب‌ها می‌تواند صرفه جویی بسیار زیادی در صنعت هوافضا و موتورهای تولید نیرو در بر داشته باشد. بنابراین اتصال سوپرآلیاژها یک نیاز بسیار ضروری به منظور صرفه جویی هزینه در صنعت محسوب می‌شود. همچنین اتصال سوپرآلیاژها برای تولید اولیه قطعاتی که تلورانس ابعادی بالایی دارند مانند نازل اسپری سوخت جت و اتصال آلیاژهای غیر مشابه مورد نیاز خواهد بود.

روش‌های معمول تعمیر قطعات آسیب دیده مانند جوشکاری نفوذی و لحیم کاری سخت برای اتصال سوپرآلیاژها دارای محدودیت‌هایی است. بنابراین دووال¹ و همکارانش [1] روش اتصال در حالت مایع گذرا² که به اختصار به آن TLP گفته می‌شود و ترکیبی از فرآیندهای اتصال لحیم کاری سخت (اتصال در حضور یک مایع) و اتصال نفوذی (حالت جامد) را ارائه نمودند. یکی از مزایای اقتصادی و فنی این روش کاهش قابل توجه فشار مورد نیاز برای اتصال در مقایسه با اتصال نفوذی در حالت جامد است.

در اتصال TLP، یک لایه واسط محتوی عناصر کاهنده نقطه ذوب³ (MPD) مانند بور، فسفر و سیلیسیم بین دو سطحی که به یکدیگر باید متصل شوند قرار داده می‌شود و سپس مجموعه تا دمای اتصال که کمی بالاتر از دمای ذوب لایه واسط است حرارت داده می‌شود. لایه واسط به علت پایین‌تر بودن دمای ذوب نسبت به فلز پایه، ذوب شده و فاصله بین دو سطح را لایه‌ی نازکی از مذاب پر می‌کند. با نگهداری مجموعه در این دما، نفوذ متقابل بین فلز پایه و لایه واسط، باعث تغییر ترکیب شیمیایی فصل مشترک و انجماد همدمای مذاب در منطقه اتصال می‌گردد. نگهداری بیشتر مجموعه در دمای اتصال، موجب نفوذ متقابل اتم‌ها لایه واسط و فلز پایه در نتیجه همگن شدن منطقه‌ی اتصال از نظر ترکیب شیمیایی و ریز ساختار با فلز پایه می‌شود.

یکی از ویژگی‌های جالب فرآیند TLP، منجمد شدن لایه مذاب تشکیل شده به صورت همدمای است. در اکثر فرآیندهای اتصال که با فاز مذاب درگیر هستند برای مثال جوشکاری ذوبی و لحیم کاری، انجماد با کاهش دما صورت می‌گیرد. بنابراین در هنگام سرد شدن فاز مذاب، به علت پس زده شدن عناصر آلیاژی در حین انجماد احتمال تشکیل فازهای ثانویه مضر در محل اتصال وجود دارد. در اتصال TLP انجماد در یک دمای ثابت صورت می‌گیرد. در این فرآیند با نفوذ عنصر حل‌شونده در فاز جامد، حجم فلز مذاب کم شده تا اینکه انجماد کامل شود. در

¹ Doval

² Transient Liquid Phase

³ Melting Point Depressant

این نوع انجماد بر خلاف انجماد همراه با کاهش دما که بوسیله نفوذ در فاز مذاب کنترل می‌شود، انجماد به علت نفوذ متقابل عناصر حل‌شونده مذاب در فاز جامد صورت می‌گیرد. از آنجایی که در انجماد هم‌دما عناصر حل‌شونده در فصل مشترک مذاب/ جامد پس زده نمی‌شوند احتمال تشکیل فازهای نامطلوب بین فلزی کاهش می‌یابد.

بر اساس بررسی های انجام شده اتصال ناهمگون دو سوپرآلیاژ IN738 و FXS-414 تا کنون انجام نشده است. هدف اصلی از این تحقیق، بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال TLP ناهمگون سوپرآلیاژ پایه کبالت FSX-414 به سوپر آلیاژ پایه نیکل IN738 توسط لایه واسط از جنس MBF80 می باشد. شبیه سازی یک بعدی اتصال TLP ناهمگون سوپر آلیاژ FSX-414 به IN738 از دیگر اهداف این تحقیق است.

فصل اول

مقدمه

۱-۱- سوپر آلیاژها:

منشاء و توسعه سوپر آلیاژها می‌تواند همزمان با تولید و پیشرفت توربین‌های بخار در نظر گرفته شود. اگرچه توربین‌های بخار برای سالیان بسیار زیادی شناخته شده بود ولی کاربرد صنعتی آنها تا بیش از دو دهه، به دلیل نبود مواد مناسب به تعویق افتاده بود. روند توسعه سوپر آلیاژها از جنگ جهانی دوم به بعد شدت گرفت [۲]. سهم بیشتر این پیشرفت ناشی از چندین عامل از جمله، تکنیک ذوب القائی در خلاء^۴ (VIM) برای جلوگیری از اکسیداسیون عناصر و تشکیل پوشش مقاوم بود و یا استفاده از مواد با انجماد جهت دار و استفاده از تک کریستالها بوده است.

سوپر آلیاژها را می‌توان به سه دسته تقسیم کرد:

۱- سوپر آلیاژهای پایه نیکل

۲- سوپر آلیاژهای پایه کبالت

۳- سوپر آلیاژهای پایه آهن

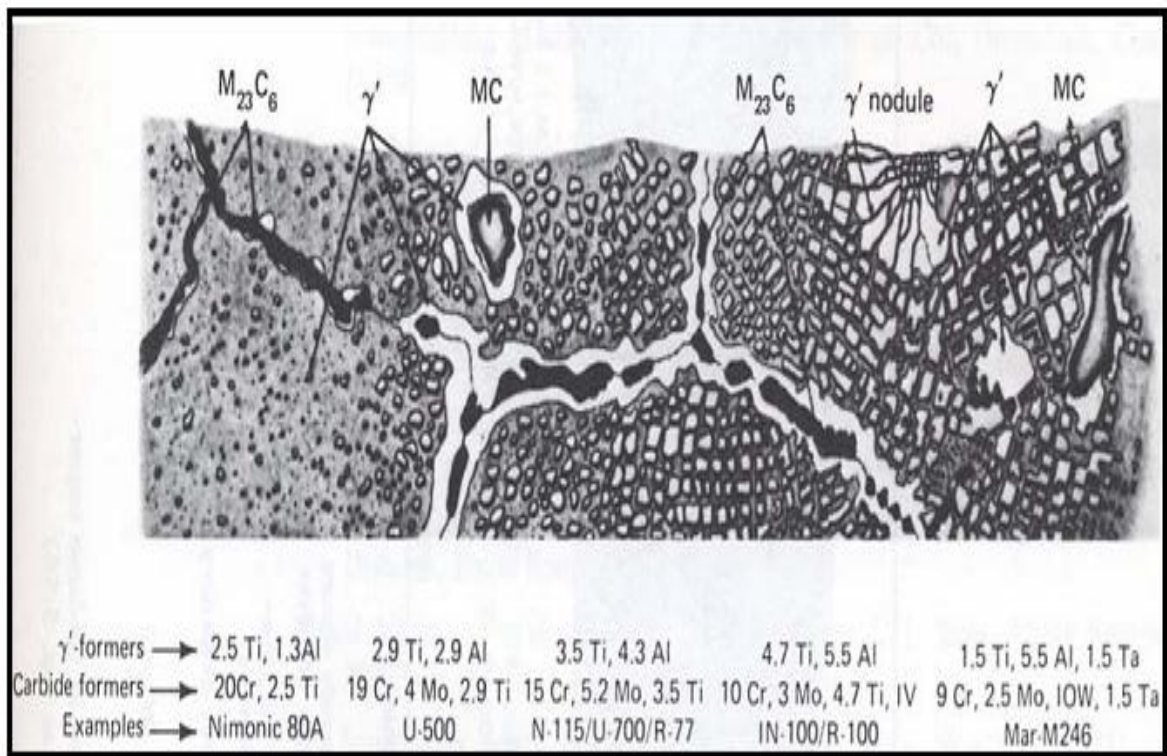
با توجه به اینکه هدف از این تحقیق اتصال سوپر آلیاژ پایه نیکل IN738 به سوپر آلیاژ پایه کبالت FSX-414 می‌باشد لذا در ادامه ریزساختار و ویژگیهای سوپر آلیاژهای پایه نیکل و کبالت مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱-۲- ریزساختار سوپر آلیاژهای پایه نیکل:

ریزساختار معمول سوپر آلیاژهای پایه نیکل در شکل (۱-۱) نشان داده شده است. به طور کلی ریز ساختار این آلیاژها شامل زمینه γ ، فاز γ' و کاربیدها می‌باشد. IN738 یک سوپر آلیاژ پایه نیکل توسعه یافته برای تولید قطعات موتور توربین‌های بخار با مقاومت خزشی عالی در دمای بالا است و قادر به مقاومت در برابر

⁴ Vacuum Induction Melting

خوردگی داغ در محیط موتورهای هواپیما است [۳]. به منظور جلوگیری از تشکیل حفرات انقباضی و همچنین اکسیداسیون فلز مذاب، فرآیند ریخته‌گری این آلیاژها در شرایط خلاء انجام می‌شود.



شکل ۱-۱- تصویر شماتیک ریزساختار سوپرآلیاژهای پایه نیکل [۲]

استحکام بالای این آلیاژ در درجه اول ناشی از رسوب بین فلزی $Ni_3(Al,Ti)$ از نوع فاز γ' در زمینه آستنیتی محلول جامد γ ، و سپس کاربیدها تشکیل شده در مرزخانه‌ها است.

ریزساختار IN738 به دلیل مقدار زیاد عناصر آلیاژی و نیز فرآیند تولید دارای اجزاء مختلفی است که در ادامه به تشریح آنها پرداخته می‌شود.

۱-۲-۱- فاز زمینه γ :

فاز زمینه سوپرآلیاژ IN738 یک محلول جامد FCC از فاز γ است. در این زمینه ترکیبات بین فلزی γ' از نوع $Ni_3(Al,Ti)$ ، و نیز کاربیدها و دیگر فازها رسوب می‌کنند [۳]. عناصر محلول جامد در فاز γ شامل Co، Cr، Fe، Mo، W، Ti و Al هستند.

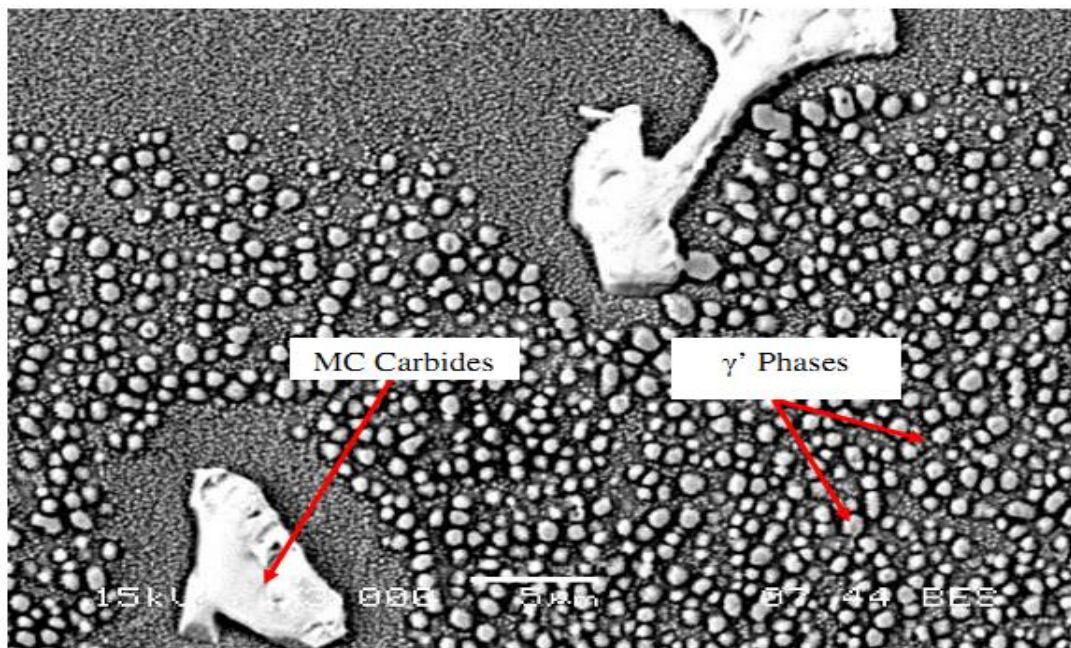
زمینه γ مقداری از استحکام خود را با مقاوم سازی محلول جامد ایجاد می کند که ناشی از مقاومت در برابر حرکت نابجائی ها به دلیل اعوجاج ناشی از اختلاف اندازه اتمی بین نیکل و عناصر محلول آلیاژی شامل Mo ، W ، Cr می باشد. در دمای حدود $0.6T_m$ ، استحکام فاز γ وابسته می شود به نفوذ آهسته عناصر Mo و W که مناطق بسیار سختی را تشکیل می دهند.

۱-۲-۲- فاز γ' :

عامل اصلی استحکام بخشی سوپرآلیاژ IN738 ، وجود ذرات فاز γ' در زمینه γ با پارامتر شبکه ای بسیار نزدیک به آن است، نزدیک بودن پارامتر شبکه رسوب γ' با زمینه γ موجبات افزایش استحکام اتصال رسوب به زمینه را فراهم می سازد. بررسی ها نشان داده است که شکل رسوبات به میزان عدم انطباق زمینه و رسوب بستگی دارد به عنوان مثال برای میزان عدم انطباق $0.2-0.4$ درصد، شکل رسوب کروی و $0.5-1$ درصد شکل رسوب مکعبی و از $2/5-1$ درصد شکل رسوب صفحه ای خواهد بود. [۳].

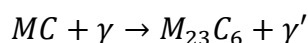
۱-۲-۳- کاربیدها:

کربن با عناصر دیرگداز مانند Ti ، Mo ، Ta و W تشکیل کاربیدها MC می دهد که در شکل (۱-۲) نشان داده شده است. آنها معمولاً در طول انجماد و با مورفولوژی تصادفی مکعبی یا به شکل حروف زبان چینی تشکیل می شوند. خواص مکانیکی سوپرآلیاژهای پایه نیکل می تواند به شدت از سوی مورفولوژی و توزیع کاربیدها تحت تاثیر قرار گیرد. کاربیدهای MC مانند خطوط چینی در طول مرز دانه ها می توانند مقدار تغییر شکل ناشی از خزش را کاهش دهند و چنانچه توزیع پیوسته ای داشته باشند به عنوان محل هایی برای ترک های اولیه و مسیر انتشار ترک عمل می کنند. [۴]



شکل ۱-۲- ریزساختار سوپرآلیاژ پایه نیکل IN738 شامل کاربیدهای MC و فاز γ' [۳]

در طول عملیات حرارتی و در معرض گرما کاربیدهای MC به آرامی تجزیه می شوند و باعث انجام تعدادی واکنش می شوند. از میان این واکنش ها می توان به واکنش زیر اشاره کرد:



برای تشکیل کاربیدهای M_6C نیز واکنش مشابهی گزارش شده است. مطابق با ترکیب شیمیایی آلیاژ و نیز فرآیند عملیات حرارتی، کاربیدهای $M_{23}C_6$ می تواند به M_6C تبدیل شود. [۵]

۱-۳- ریزساختار سوپر آلیاژهای پایه کبالت:

کبالت خالص یک ماده آلوتروپیک است و در دمای 427°C یک تحول فازی از ϵ (hcp) به γ (fcc) دارد و در 1200°C تحول فازی معکوس اتفاق می افتد. ساختار مطلوب برای سوپر آلیاژهای پایه کبالت ساختار fcc است بنابراین استحاله فازی fcc به hcp نامطلوب می باشد [۶]. سوپر آلیاژهای پایه کبالت قابلیت جوش خوب و مقاومت به خوردگی داغ دارند و نسبت به سوپرآلیاژهای پایه نیکل عناصر دیرگداز بیشتری دارند در حالیکه استحکام آنها از سوپرآلیاژهای پایه نیکل کمتر است [۷]. این دسته از سوپرآلیاژها معمولا

ترکیبی از آلیاژهای کبالت با عناصر کروم، تنگستن، کربن و نیکل هستند. کروم محافظت در برابر خوردگی داغ و اکسیداسیون ایجاد می‌کند. تنگستن استحکام محلول جامد به وجود می‌آورد و کربن تشکیل کاربیدهایی با کروم می‌دهد این کاربیدها منشا اصلی استحکام آلیاژ هستند. عنصر نیکل نیز سوپرآلیاژ را در ساختار fcc پایدار نگه می‌دارد. آلیاژهای x-40 ، x-45 و FSX-414 این گروه از عناصر آلیاژی را دارا می‌باشند [۸]. علاوه بر عناصر آلیاژی بالا، تیتانیوم، زیرکونیم، تالیوم و بعضی مواقع تنگستن نیز به بعضی از سوپرآلیاژهای پایه کبالت اضافه می‌شوند این عناصر تشکیل کاربیدهای توسط این عناصر موجب افزایش بیشتر استحکام سوپرآلیاژ می‌گردد [۸]. اضافه کردن مقدار کمی سیلیسیم و منگنز مقاومت در برابر اکسیداسیون بالا می‌برد همچنین بور تشکیل بوراید می‌دهد و استحکام محلول جامد به وجود می‌آورد. عنصر مولیبدن اگرچه به طور گسترده‌ای در سوپرآلیاژهای پایه نیکل استفاده می‌شود ولی در سوپرآلیاژهای پایه کبالت بسیار کم به کار می‌رود. در این دسته از سوپرآلیاژها اثر تنگستن قابل توجه بوده و معایب آن کمتر است [۶].

به طور کلی ریزساختار اغلب سوپرآلیاژهای پایه کبالت شامل زمینه آستنیتی γ و فازهای مختلف کاربیدی و ترکیبات بین فلزی می‌باشد.

۱-۳-۱- فاز زمینه γ :

فاز زمینه سوپرآلیاژهای پایه کبالت یک فاز آستنیتی γ با ساختار fcc است که شامل چندین عنصر محلول جامد می‌باشد. با اضافه کردن عناصر محلول جامد گروه چهارم (Ti, Zr) و گروه هشت جدول تناوبی مندلیف و همچنین عناصر منگنز و کربن، پارامتر شبکه γ افزایش و با افزودن عناصر گروه شش جدول (Cr, Mo, W) و سیلیسیم پارامتر شبکه γ کاهش می‌یابد. در سوپرآلیاژهای تجاری با افزودن نیکل، فاز γ پایدار می‌گردد [۸].

۱-۳-۲- کاربیدها:

استحکام سوپرآلیاژهای پایه کبالت ناشی از تشکیل فازهای کاربیدی در زمینه و مرزدهانه‌ها می‌باشد. عناصر تشکیل دهنده کاربیدها عناصر گروه چهارم (Ti, Zr, Hf) و گروه پنجم (Ca, Ta) و گروه ششم جدول تناوبی (Cr, Mo, W) می‌باشند. نوع کاربید تشکیل شده در سوپرآلیاژ پایه کبالت به ترکیب

شیمیایی و عملیات حرارتی بستگی دارد و معمولاً شامل کاربدهای M_3C_2 ، M_7C_3 ، $M_{23}C_6$ ، M_6C و MC هستند [۸].

۱-۴- فرآیند اتصال سوپرآلیاژها:

ضرورت اتصال سوپرآلیاژها به یکدیگر را می‌توان از سه جهت مورد بررسی قرار داد که به اختصار بیان می‌گردد:

❖ **تعمیر و بازسازی:** افزایش دمای کاری توربین‌ها موجب افزایش کارایی آنها می‌گردد اما این موضوع موجب تخریب سریع اجزاء توربین‌ها توسط مکانیزم‌های ترمودینامیکی، اکسیداسیون و خزش می‌شود. به منظور افزایش عمر کاری اجزاء توربین و صرفه جویی در هزینه‌ها، لازم است اجزاء آسیب دیده تحت تعمیر و بازسازی قرار گیرند. یکی از راه‌های تعمیر قطعات آسیب دیده به ویژه پره توربین‌های گازی، برداشت ناحیه فرسوده شده از پره و جایگزینی آن با یک جزء سالم است. این جزء به بخش باقیمانده و سالم پره اتصال داده می‌شود [۹، ۱۰].

❖ **ساخت قطعات پیچیده:** پیچیدگی اجزای موتور توربین‌های گازی با بهبود کارایی افزایش می‌یابد. علاوه بر این افزایش حجم توربین‌های زمینی باعث می‌شود قطعات اجزاء بزرگ بیشتر دچار نقص‌هایی مانند تشکیل آخال شوند. برای کم کردن مشکل و ساخت قطعات پیچیده، اجزاء می‌توانند در چندین قسمت ساخته شوند و سپس به یکدیگر متصل شوند. [۱۱]

❖ **ساخت قطعات با اجزاء مختلف:** در برخی شرایط کاری لازم است اجزاء مختلف یک قطعه مهندسی از مواد مختلف ساخته شود. یکی از راه‌های ساخت این قطعات، تهیه اجزاء آن و اتصال آن در مرحله بعدی است [۲].

ترکیب و ریزساختار سوپرآلیاژها، برای شرایط کاری دمای بالا طراحی و توسعه یافته‌اند. بنابراین روش‌های اتصال سوپرآلیاژها لازم است به گونه‌ای باشد که با کارکرد اجزاء اتصال یافته در دماها و تنش‌های بالا سازگاری داشته باشد. اتصال نفوذی، جوشکاری ذوبی و لحیم کاری سه تکنیک اصلی استفاده شده در صنعت برای اتصال مواد با دمای اتصال بالا هستند [۲]. همه این روش‌ها برای اتصال سوپرآلیاژها دارای محدودیت‌هایی هستند. در ادامه برخی از محدودیت‌ها به اختصار بیان می‌شود.

۱-۵-۵-۱- برخی از محدودیت‌ها در روش‌های اتصال سوپراآلیاژها:

۱-۵-۵-۱- جوشکاری ذوبی:

جوشکاری ذوبی یکی از روش‌های اتصال مواد فلزی در دمای بالا می‌باشد. این نوع جوشکاری باعث ایجاد ترک گرم، کاهش خواص اتصال [۱۴-۱۲، ۱]، ترک در فلز پایه و منطقه تحت تاثیر نفوذ (HAZ) در طول اتصال و در طول عملیات حرارتی بعد از اتصال می‌گردد. از دیگر مشکلات مربوط به جوشکاری ذوبی رسوب فازهای ثانویه شکنده در منطقه اتصال و منطقه HAZ است که منجر به کاهش خواص مکانیکی مانند استحکام کششی، استحکام تسلیم و شکل‌پذیری می‌شود [۱۴]. همچنین جدایش ناخالصی‌ها و عناصر آلیاژی ممکن است در منطقه اتصال اتفاق بیفتد که منجر به کاهش مقاومت اکسیداسیون و استحکام خستگی در منطقه اتصال نسبت به فلز پایه می‌گردد [۲].

۱-۵-۲- اتصال نفوذی:

اتصال نفوذی یک روش اتصال برای مواد فلزی و سرامیکی می‌باشد این روش برای اتصال مواد غیرمشابه نیز می‌تواند به کار گرفته شود یکی از مزایای مهم این روش حذف منطقه تحت تاثیر حرارت در اتصالات می‌باشد. از آنجاییکه اتصال نفوذی متکی به نفوذ است بنابراین برای بدست آوردن یک اتصال مناسب لازم است زمان اتصال به اندازه کافی طولانی باشد. علاوه بر این ایجاد فشار بالا و یکنواخت به سطوح اتصال به ویژه برای سطوح اتصال پیچیده ضروریست و ممکن است به قالب‌های گران‌قیمت و پیچیده نیاز داشته باشد [۱، ۱۵].

۱-۵-۳- لحیم‌کاری:

یکی از محدودیت‌های روش لحیم‌کاری این است که درجه حرارت ذوب مجدد کمتر از درجه حرارت کاری سوپراآلیاژها و تشکیل ترکیبات بین فلزی است بطوریکه این موضوع موجب کاهش خواص مکانیکی و فیزیکی اتصال می‌شود [۱، ۱۵].

با توجه به محدودیت‌های ذکر شده برای روش‌های اتصال سوپراآلیاژها، روش اتصال TLP برای اتصال سوپراآلیاژها با توجه به مزیت‌های آن مورد توجه قرار گرفته است که در فصل بعد بطور مفصل بدان پرداخته خواهد شد.

فصل دوم

آشنایی با روش اتصال حالت مایع گذرا (TLP)

۲-۱- اتصال^۱ TLP:

فرآیند اتصال حالت مایع گذرا (TLP) یک روش اتصال نفوذی است که در آن یک لایه واسط با نقطه ذوب پایین تر از فلز پایه در بین دو قطعه اتصال یابنده قرار داده شده و مجموعه در دمایی بالاتر از نقطه ذوب لایه واسط و کمتر از نقطه ذوب فلز پایه قرار داده می‌شود. تحت این شرایط لایه واسط حاوی عناصر کاهنده نقطه ذوب، ذوب می‌شود. در طول ننگه داری مجموعه در دمای اتصال، عناصر کاهنده نقطه ذوب از طریق نفوذ بلند برد به فلز پایه منتقل می‌شوند که این امر منجر به حرکت فصل مشترک جامد/ مذاب و انجماد همدمای می‌گردد [۱۶]. انجماد همدمای هنگامی که دو فصل مشترک در خط مرکزی اتصال با یکدیگر تلاقی می‌کنند کامل خواهد شد.

پس از کامل شدن فرآیند اتصال TLP، دمای ذوب مجدد ناحیه اتصال و فلز پایه یکسان خواهد بود. این تغییر نقطه ذوب، تفاوت اصلی اتصال TLP با لحیم کاری در دمای بالا است و باعث می‌شود اتصال TLP برای کاربردهایی که نیاز به کار در دمای بالایی دارند مناسب باشد. از آنجاییکه ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال در این روش تطابق خوبی با فلز پایه دارد، اتصال TLP قابلیت بسیار زیادی برای اتصال موادی که از طریق فرآیندهای جوش معمولی متصل نمی‌شوند را دارد [۱۸-۱۶، ۱]. اتصال TLP برای ساخت و تعمیر پره‌های توربین و فضاپیماها و قطعاتی که نیاز به استحکام دمای بالا دارند کارآمد است. مکانیزم انجماد همدمای باعث می‌شود اتصال TLP برای اتصال کامپوزیت‌های زمینه فلزی، آلیاژهای حافظه دار، تک کریستال‌ها و مواد بین‌فلزی مناسب باشد.

منابع تاریخی نشان می‌دهد که استفاده از این فرآیند اتصال، به دوران باستان باز می‌گردد. در حقیقت این فناوری ۲۵۰۰ سال قبل از میلاد برای تزئین خنجرهای طلا به کار گرفته شده است [۱۹]. دهه ۱۹۷۰ میلادی، دهه توسعه فرآیند اتصال TLP در صنعت هوا فضا بود [۱۹]. در سال ۱۹۷۴ میلادی عبارت حالت مایع گذرا (TLP) توسط اوکزارسکی^۲ و همکارانش ابداع شد [۲۰].

^۱ Transient Liquid Phase

^۲ Owczarski

انواع دیگری از فرآیند اتصال TLP نیز وجود دارد که از جمله آنها می‌توان به فناوری جدید حالت مایع گذرا با شیب حرارتی^۱ (TG-TLP) اشاره کرد. در این روش به منظور کاهش زمان مرحله انجماد همدم، دما با یک شیب مشخص کاهش می‌یابد [۲۱].

۲-۲- مراحل اتصال TLP:

فرآیند اتصال TLP توسط برخی از محققین به چندین روش مختلف تبیین شده است [۱۷-۱۵، ۱] در یکی از این تحقیقات فرآیند اتصال در ۴ مرحله به شرح زیر تقسیم بندی شده است [۱۶]:

۱- حرارت دهی

۲- انحلال و گسترش

۳- انجماد همدم

۴- همگن سازی

در ادامه مراحل فرآیند تشریح می‌گردد.

۲-۲-۱- مرحله حرارت دهی:

در طول مرحله حرارت دهی، کل مجموعه در یک کوره قرار داده شده و دمای آن از دمای اتاق تا زیر دمای یوتکتیک افزایش می‌یابد، همانگونه که در شکل (۲-۱) نشان داده شده است. به منظور جلوگیری از اکسیدشدن ناحیه اتصال در دمای بالا، کل فرآیند در خلاء یا اتمسفر خنثی انجام می‌شود. هنگامی که مجموعه گرم می‌شود مقداری نفوذ در حالت جامد بین لایه واسط و فلز پایه اتفاق می‌افتد. مقدار نفوذ بستگی به چندین فاکتور دارد از جمله شرایط سطحی (زبری و تمیزی سطح)، فشار وارد بر سطح (فشار بالا به بهبود سطح تماس و صاف بودن سطح کمک می‌کند) [۱۹]. در اکثر موارد انتظار می‌رود مقدار نفوذ در این مرحله کم باشد. با این حال مقدار جرم منتقل شده در این مرحله به دمای یوتکتیک، نرخ حرارت دهی و ضریب نفوذ بستگی دارد [۱۶]. هرچه مرحله حرارت دهی طولانی‌تر باشد، نفوذ عناصر کاهنده نقطه ذوب در فلز پایه بیشتر می‌شود. اگر نرخ حرارت دهی بسیار پایین باشد و مرحله حرارت دهی بیش از حد طولانی شود، ممکن است حداکثر غلظت عنصر حل‌شونده در لایه واسط پایین تر از مقدار لازم آن برای ذوب شدن برسد و

¹ Temperature Gradient Transient Liquid Phase