دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی مواد

جوشکاری غیرمشابه سوپرآلیاژ اینکولو ۸۰۰ به فولاد مقاوم به حرارت 25Cr-35Ni و ارزیابی خواص اتصال

رساله دکترای مهندسی مواد

رضا دهملایی

استاد راهنما
دکتر مرتض شمعانان

۱۳۸۶

من لم یشکر المخلوق لم یشکر الخالق

تشکر و قدردانی

در آغاز بر خود لازم می دانم از اساتید ارجمند و بزرگوارم آقایان دکتر مرتض شمعانان و دکتر احمد کرمانپور به لحاظ کمک های بی دریغ ، مباحث مفید و نقش موثر ایشان در هدایت این پژوهش تشکر و قدردانی نموده و اجر زحمات ایشان را از درگاه احدیت خواستار گردم. از زحمات و مساعدت های بی دریغ همه اساتد محترم دانشکده بوژه راست محترم دانشکده آقا دکتر فتح و آقایان دکتر محمد حسن عباسی، پرفسور عل سعد، پروفسور احمد ساعتچی، پروفسور فخرالدن اشرف زاده، پروفسور مهد صالح، دکتر محمد طرق نژاد، دکتر مسعود پنجه پور و دکتر احمدان در طی دوره تحصل خود بوژه در مقطع دکتر سپاسگزاری می نمایم.

از پدر و مادر گرامیم بخاطر تلاشهای آنان در طی دوران تحصیلات خویش متشکرم. از همسر مهربانم و فرزندان عززم (پرسان و محمد) بخاطر تشویق ها، دلگرمی ها و تحمل صبورانه آنها در طی این پژوهش سپاسگزارم. از خانواده گرانقدر همسرم بخاطر مساعدت آنان در طی دوره دکتری قدردانی می نمایم.

از سروران عزیزم در دانشگاه صنعتی اصفهان آقایان محمود صادقی، آقا نصر اله عربان، سرکار خانم مهندس کرباس، آقا مویدی، مهندس کامران صائب، آقای عبادی منش، خانم مهندس علوی و سرکار خانم فتحی و سار عززان که در طی این پژوهش اینجانب را یاری نمودند تشکر می نمایم.

همچنن مراتب تشکر و سپاس خود را از همکار و مساعدتها بدرغ مسئولن محترم شرکت پالاش نفت اصفهان اعلام م دارم. از مسئولن محترم پژوهشگاه مواد و انرژ نز تشکر به عمل م آد.

در پایان از ریاست محترم دانشگاه، معاونت محترم مالی و اداری، معاونت محترم آموزشی ، معاونت محترم پژوهشی، معاونت محترم دانشجویی ، ریاست محترم تحصیلات تکمیلی دانشگاه و کلیه اساتید و کارکنان محترم دانشکده مهندسی مواد – دانشگاه صنعتی اصفهان بخاطر مساعدت آنان در طی دوران تحصیلات دانشگاهی خود نهایت سپاس و تشکر را دارم.

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،
ابتکارات و نوآوریهای ناشی از تحقیق موضوع
این رساله متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم به همسرم

که بدون پشتیبانی او این تحقیق میسر نبود

To My Wife

Without her support , this research would never have been finished

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

چکیده
فصل اول :مقدمه.....۱

فصل دوم: مرور مطالعاتی.....۴
۲-۱- سوپر آلیاژها ۴
۲-۱-۱-مقدمه.....۴
۲-۱-۲-معرفی سوپر آلیاژها.....۵
۲-۱-۳-انواع سوپر آلیاژها ۶
۲-۱-۳-۱-سوپرآلیاژهای پایه آهن-نیکل ۶
۲-۱-۳-۲-سوپر آلیاژهای پایه نیکل.....۶
۲-۱-۴-ساختار و فازهای موجود در سوپر آلیاژها.....۷
۲-۱-۵-تاثیر عناصر آلیاژی بر سوپر آلیاژها.....۱۰
۲-۱-۶-کاربرد سوپر آلیاژها.....۱۰
۲-۱-۷-جوشکاری سوپر آلیاژها.....۱۱
۲-۱-۷-الف-عملیات جوشکاری ذوبی سوپر آلیاژها.....۱۲
۲-۱-۷-ب-جوشکاری سوپر آلیاژهای پایه کبالت.....۱۳
۲-۱-۷-ج-جوشکاری سوپر آلیاژهای پایه نیکل و آهن-نیکل.....۱۳
۲-۱-۷-د-جوشکاری حالت جامد سوپر آلیاژها.....۱۴
۲-۲- اینکولوی ۸۰۰.....۱۴
۲-۲-۱-معرفی سوپر آلیاژ اینکولوی ۸۰۰.....۱۴
۲-۲-۲-ترکیب شیمیایی و خواص فیزیکی.....۱۶
۲-۲-۳-خواص مکانیکی.....۱۷
۲-۳-جوش‌پذیری اینکولوی ۸۰۰.....۲۰
۲-۴-معرفی فولادهای مقاوم به حرارت ۲۳
۲-۴-۱-ریزساختار فولادهای مقاوم به حرارت ۲۹

۲-۴-۲-خواص مکانیکی فولادهای مقاوم به حرارت..... ۳۰
۲-۴-۳-خوردگی فولادهای مقاوم به حرارت در دمای بالا ۳۱
۲-۴-۴-انتخاب آلیاژ..... ۳۴
۲-۴-۵-کاربردهای تجاری فولادهای مقاوم به حرارت ۳۵
۲-۵- معرفی فولاد مقاوم به حرارت HP ۳۵
۲-۶-جوشکاری فولاد مقاوم به حرارت HP ۴۰
۲-۷-جوش پذیری ۴۲
۲-۷-۱--مفهوم جوش پذیری ۴۲
۲-۷-۲-آزمونهای جوش‌پذیری ۴۳
۲-۷-۲-الف-آزمایشهای جوش‌پذیری برای ارزیابی حساسیت به ترک خوردن داغ ۴۳
۲-۷-۲-ب-آزمایش وارسترینت ۴۴
۲-۷-۲-ج- آزمایش وارسترینت نقطه ای ۴۹

فصل سوم :مواد و روش انجام آزمایشها ۵۱
۳-۱- مواد مصرفی ۴۱
۳-۲- آماده سازی نمونه ها و طرح اتصال ۵۲
۳-۳-عملیات حرارتی نمونه ها ۵۲
۳-۴- جوشکاری نمونه‌ها ۵۳
۳-۵- مطالعه تاثیر حرارت ورودی ۵۳
۳-۶- مطالعه تاثیر دمای بین پاسی ۵۴
۳-۷- متالوگرافی ۵۴
۳-۸- آزمایش های مکانیکی ۵۴
۳-۹- آزمایش جوش‌پذیری ۵۵
۳-۱۰- بررسی توسط میکروسکوپ الکترونی عبوری **(TEM)** ۵۷
۳-۱۱- آزمایش دیلاتومتری ۵۷

فصل چهارم :نتایج و بحث ۵۸
۴-۱-بررسی‌های ریز ساختاری ۵۸
۴-۱-۱-ریز ساختار فلزات پایه ۵۸
۴-۱-۱-الف-ریز ساختار آلیاژ ۸۰۰ ..... ۵۸

٤-١-١-ب- ریز ساختار فولاد مقاوم به حرارت HP ٦٧
٤-١-٢-ریز ساختار فلزات جوش ٧٢
٤-١-٢-الف-تاثیر نوع فلز پر کننده بر ریزساختار ناحیه جوش ٧٤
۴-۱-۲-ب-تاثیر حرارت ورودی بر ریز ساختار فلز جوش..... ۷۹
۴-۲- بررسی خواص مکانیکی ۸۰
۴-۲-۱-خواص مکانیکی فلزات پایه ۸۰
۴-۲-۲-خواص مکانیکی فلزات جوش ۸۱
۴-۲-۳-تاثیر دمای عملیات حرارتی آنیل انحلالی بر خواص مکانیکی فلزات پایه ۸۲
۴-۳- جوش‌پذیری ۸۳
۴-۳-۱- تاثیر ریز ساختار اولیه ۸۳
۴-۳-۲-تاثیر حرارت ورودی ۹۴
۴-۳-۳ تاثیر نوع فلز پرکننده ۱۰۰
۴-۳-۴-تاثیر درجه حرارت بین پاسی ۱۰۸

فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات ۱۱۰
نتیجه گیری ۱۱۰
پیشنهادات ۱۱۲

مراجع ۱۱۳

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل-۲-۱ریز ساختار سوپر آلیاژها (a) آلیاژ پایه کبالت ریخته‌گی با بزرگنمایی ۲۵۰ برابر (b) آلیاژ پایه نیکل ریخته‌گی با بزرگنمایی ۱۰۰ برابر (c) آلیاژ پایه نیکل کار شده (چپ با بزرگنمایی ۳۳۰۰ برابر) و ریختگی (راست با بزرگنمایی ۵۰۰۰ برابر) (d) دو آلیاژ پایه آهن-نیکل کار شده (چپ با بزرگنمایی ۱۷۰۰۰ برابر) و IN-718 (راست با بزرگنمایی ۳۳۰۰ برابر) ۸

شکل۲-۲ تغییرات خواص کششی آلیاژ ۸۰۰ با تغییر دما ۱۹

شکل ۲-۳ استحکام خزشی آلیاژ ۸۰۰ آنیل انحلالی شده در دماهای مختلف ۲۰

شکل ۲-۴ استحکام پارگی آلیاژ ۸۰۰ آنیل انحلالی شده در دماهای مختلف ۲۰

شکل۲-۵ اثر کرنش و درصد سیلیسیوم بر حساسیت به ترک داغ آلیاژ ۸۰۰ که مقادیر سیلیسیوم به ترتیب در A، ۰/۳۹ در B، ۰/۰۸ در D، ۰/۲۶ و در E، ۰/۱۵ درصد..... ۲۱

شکل۲-۶- ذوب شدن و ضخیم شدن مرز دانه‌ها در ناحیه متاثر از حرارت آلیاژ ۸۰۰..... ۲۳

شکل۲-۷- مقایسه تاثیر درجه حرارت بر ضریب انبساط حرارتی سوپرآلیاژهای پایه نیکل و فولادهای زنگ نزن..... ۲۴

شکل ۲-۸- نتایج آزمایش وارسترسنت برای ارزیابی حساسیت به ترک داغ فلزات پر کننده مختلف در اتصال غیر مشابه آلیاژ ۸۰۰ با فولاد زنگ نزن ۳۱۶ (a) مجموع طول ترک (b) حداکثر طول ترک ۲۴

شکل ۲-۹- مشخصه فولادها ی ریختگی مقاوم به حرارت بر حسب درصد نیکل-کرم..... ۲۶

شکل۲-۱۰- استحکام خزش فولادهای مقاوم به حرارت به صورت تابعی از درجه حرارت..... ۳۳

شکل۲-۱۱-ریزساختار فولاد HP ریختگی قبل از پیر شدن در دو بزرگنمایی مختلف الف-۱۰۰ برابر ب- ۵۰۰ برابر..... ۳۶

شکل۲-۱۲ -ریزساختار فولاد HP ریختگی بعد از پیرشدن در دو بزرگنمایی مختلف الف-۱۰۰ برابر ب- ۵۰۰ برابر..... ۳۶

شکل۲-۱۳-اثر درصد کربن برمقدار کاربیدهای یوتکتیک در مرزدانه‌های فولاد ریختگی HP.... ۳۷

شکل ۲-۱۴- ریز ساختار مناطق مختلف جوش برای فولاد مقاوم به حرارت HP الف- در حالت ریختگی ب- در حالت پیر شده..... ۴۰

شکل ۲-۱۵-محل خوردگی داغ همراه با شکل و موقعیت ایجاد حفره در مقاطع جوش فولاد HP..۴۲
شکل ۲-۱۶- دستگاه و نمونه آزمایش وارسترینت.....۴۶
شکل ۲-۱۷- آزمایش وارسترینت برای ارزیابی حساسیت به ترک داغ فلز پرکننده.....۴۶
شکل ۲-۱۸ دستگاه آزمایش وارسترینت عرضی.....۴۷
شکل ۲-۱۹- الگوی ارتباط بین ترک داغ و موقعیت حوضچه جوش در لحظه اعمال کرنش.....۴۷
شکل ۲-۲۰-نتایج آزمایش وارسترینت برای بعضی فلزات پایه.....۴۹
شکل ۲-۲۱- تاثیر شدت جریان جوشکاری بر مجموع طول ترک در آزمایش وارسترینت.....۴۹
شکل ۲-۲۲- دستگاه آزمایش وارسترینت نقطه ای.....۵۰
شکل ۳-۱ طرح اتصال استفاده شده و مشخصات ابعادی آن.....۵۲
شکل ۳-۲ دستگاه آزمایش وارسترینت مورد استفاده.....۵۶
شکل ۳-۳ تصویر شماتیک از خط جوش در آزمایش وارسترینت فلز پر کننده ۵۶
شکل ۳-۴ تصویر یک نمونه پس از آزمایش وارسترینت.....۵۷
شکل ٤-۱ ساختار میکروسکوپی اینکولوی ۸۰۰ .....۵۹
شکل ٤- ۲- تصویر میکروسکوپ الکترونی از ساختار آلیاژ ۸۰۰ .....۵۹
شکل ٤-۳-آنالیز EDS از ذرات رسوبی در اینکولوی ۸۰۰ الف-ذرات درشت TiN ب-ذرات ریز TiC..... ۶۰
شکل ۴-۴ ریزساختار میکروسکو پی آلیاژ ۸۰۰ پس از پیر شدن در دو بزرگنمایی مختلف.....۶۱
شکل ٤-۵- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از رسوبات آلیاژ ۸۰۰ الف- داخل دانه ها ب- روی مرزها ج- رسوبات دو رنگی.....۶۱
شکل ٤-۶- آنالیز EDS از رسوبات در آلیاژ ۸۰۰ پیرشده الف- رسوبات روی مرز دانه‌ها ب- قسمت تیره ذرات دو رنگی ج- قسمت شفاف ذرات دو رنگی.....۶۳
شکل ٤-۷ تصاویر میکروسکوپ الکترونی TEM از رسوبات موجود در آلیاژ ۸۰۰ پیر شده.....٦٤
شکل ۴-۸-آنالیز رسوبات و زمینه آلیاژ ۸۰۰ پیر شده توسط میکروسکوپ الکترونی TEM به همراه الگوی تفرق آنها الف- زمینه آستنیتی ب- کاربید کرم $M_{23}C_6$ که در شکل ۴-۹-ب با شماره ۱ مشخص است ج- فاز حاوی تیتانیوم و سیلیسیوم که در شکل ۴-۹-ب با شماره ۴ مشخص است د- فاز حاوی تیتانیوم و سیلیسیوم که در شکل ۴-۹-الف به صورت میله مشخص است ه- الگوی تفرق زمینه آستنیتی ی- الگوی تفرق کاربید کرم.....۶۵
شکل ٤-۹-ساختار میکروسکوپی آلیاژ ۸۰۰ پیرشده پس از دو ساعت آنیل انحلالی دردماهای مختلف الف- ۱۰۰۰°C ب- ۱۱۰۰°C ج و د- ۱۲۰۰° C در دو بزرگنمایی مختلف.....٦٦

شکل ٤-١٠ الف- تصویر میکروسکوپ الکترونی از ساختار آلیاژ ۸۰۰ پیر شده پس از دو ساعت عملیات حرارتی آنیل انحلالی در ۱۲۰۰ ب- آنالیز رسوبات سفید رنگ در شکل ٤-١٠-الف ٦٧
شکل ٤-١١-ریز ساختار فولاد HPریختگی در دو بزرگنمایی مختلف..... ٦٧
شکل ٤-١٢-تصاویر میکروسکوپ الکترونی از فولاد ریختگی HP الف-با استفاده از الکترونهای ثانویه(SE) ب-با استفاده از الکترونهای برگشتی(BS)..... ٦٨
شکل ٤-١٣-آنالیز EDS کاربیدهای اولیه در فولاد ریختگی HP الف-کاربیدهای تیره $M_{23}C_6$ ب- کاربیدهای تیره Cr_7C_3 ج-کاربیدهای روشن(NbC)..... ٦٩
شکل ٤-١٤- ساختار میکروسکوپی فولاد HP پیر شده در دو بزرگنمایی مختلف..... ٦٩
شکل ٤-١٥-الف- تصویر میکروسکوپ الکترونی از فولاد ریختگی HP پیر شده با استفاده از الکترون های برگشتی(BS) ب- تصویر میکروسکوپ الکترونی از فاز G..... ٧٠
شکل ٤-١٦- آنالیز نقطه ای EDS رسوبات در فولاد ریختگی HP پیر شده الف- کاربیدهای تیره موجود در مرز دانه ها و زمینه ب- رسوبات روشن (فاز G)..... ٧١
شکل ٤-١٧- تصاویر میکروسکوپ الکترونی TEM از رسوبات موجود در فولاد HP پیر شده الف-کاربید کرم ب- فاز حاوی تیتانیوم و سیلیسیوم (فاز G) ج- آنالیز رسوبات کاربید کرم د-آنالیز زمینه آستنیتی ن- آنالیز فاز G..... ٧١
شکل ٤-١٨- ساختار میکروسکوپی فولاد HP پیر شده پس از دو ساعت عملیات حرارتی آنیل انحلالی در دماهای مختلف الف-$1000\ ^\circ C$ ب-$1100\ ^\circ C$ ج$1200\ ^\circ C$ د- $1200\ ^\circ C$ با میکروسکوپ الکترونی..... ٧٣
شکل ٤-١٩- آنالیز EDS از کاربید نیوبیم تشکیل شده پس از آنیل انحلالی در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد..... ٧٣
شکل ٤- ٢٠ الف- ریز ساختار فلز جوش اینکونل ۸۲ ب- شماتیک تغییر حالت انجماد (با حرکت از کناره ها به سمت مرکز جوش) ج- مهاجرت مرز دانه ها در فلز جوش اینکونل۸۲ د- ریز ساختار فلز جوش اینکونل..... ٧٤
شکل ۴-۲۱- الف- تصویر میکروسکوپ الکترونی از فلز جوش اینکونل ۸۲ ب- آنالیز نقطه ای EDS رسوبات سفید ج- آنالیز نقطه ای EDS رسوبات تیره..... ٧٦
شکل۴-۲۲-الف- ریز ساختار فلز جوش اینکونل ۶۱۷ ب- مهاجرت مرز دانه ها در فلز جوش اینکونل ٦١٧ ج- تصویر میکروسکوپ الکترونی ازرسوبات در فلز جوش اینکونل ۶۱۷ ..... ٧٧
شکل ٤-٢٣-آنالیز EDS از کاربیدها در فلز جوش اینکونل ۶۱۷ الف-کاربیدهای روشن ب-کاربیدهای تیره..... ٧٨
شکل۴--۲۴ ریز ساختار فلز جوش فولاد زنگ نزن ۳۰۹ در دو بزرگنمای مختلف..... ٧٨

شکل-۴-۲۵- ساختارمیکروسکوپی فلز جوش اینکونل ۸۲ با حرارت های ورودی مختلف
الف- ۷۱۰ ژول ب- ۸۲۰ ژول ج- ۹۳۵ ژول د- ۱۱۵۰ ژول.....۷۹
شکل ٤-۲٦-ساختار میکروسکوپی نواحی مختلف جوش الف- آلیاژ ۸۰۰ ب- فولاد HP ریختگی.....۸۵
شکل ۴-۲۷-پروفیل شیمیایی عناصر نیکل، کرم و آهن در عرض ناحیه مخلوط نشده (خط AB).....۸۵
شکل ۴-۲۸- مناطق مختلف جوش بین آلیاژ ۸۰۰ پیر شده و فلز جوش الف، ب- تصاویر میکروسکوپ نوری ج، د- تصاویر میکروسکوپ الکترونی با استفاده از الکترون‌های برگشتی و، ن- تصاویر میکروسکوپ الکترونی با استفاده از الکترون‌های ثانویه.....۸۶
شکل ۴-۲۹- الف- تصویر ترک در ناحیه متاثر از حرارت آلیاژ ۸۰۰ پیر شده ب- آنالیز EDS از قسمت انتهای ترک.....۸۷
شکل ۴-۳۰ ساختار میکروسکوپی نواحی مختلف جوش آلیاژ ۸۰۰ پیر شده پس از دو ساعت آنیل انحلالی در دماهای مختلف الف- در ۱۰۰۰ ب- در ۱۱۰۰ ج- در ۱۲۰۰ د، ن- در ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد توسط میکروسکوپ الکترونی با الکترون‌های برگشتی و ثانویه.....۸۹
شکل ٤-۳۱-ساختارمیکروسکوپی نواحی مختلف جوش فولاد HP پیرشده الف، ب- تصاویر میکروسکوپ نوری ج، د- تصاویر میکروسکوپ الکترونی از ترک‌ها با استفاده از الکترون‌های برگشتی و ثانویه.....۹۰
شکل ۴-۳۲ ساختار میکروسکوپی نواحی مختلف جوش فولاد HP پیرشده پس از دو ساعت آنیل نحلالی در دماهای مختلف الف، ب- در ۱۰۰۰ $^{\circ}C$ با میکروسکوپ نوری و الکترونی ج، د- در ۱۱۰۰ $^{\circ}C$ با میکروسکوپ نوری و الکترونی ه- در ۱۲۰۰ $^{\circ}C$.....۹۲
شکل ۴-۳۳- نتایج آزمایش وارسترینت جهت ارزیابی حساسیت به ترک داغ برای فلزات پایه الف- فولاد HP ب- آلیاژ ۸۰۰.....۹۳
شکل ۴-۳۴- ساختارمیکروسکوپی مناطق مختلف فلز جوش و فولاد HP با حرارت‌های ورودی مختلف الف- ۷۱۰ ب- ۸۲۰ ج- ۹۳۵ د- ۱۰۵۰ ژول. ۹۴
شکل ۴-۳۵ ساختارمیکروسکوپی مناطق مختلف فلز جوش و آلیاژ ۸۰۰ پیرشده با حرارتهای ورودی مختلف الف- ۷۱۰ ب- ۸۲۰ ج- ۹۳۵ د- ۱۰۵۰ ژول.....۹۵
شکل ۴-۳۶ الف- تغییرات درجه حرارت بر حسب زمان در فواصل مختلف از خط ذوب (برای ترموکوپلهای شماره۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ که به ترتیب در فواصل ۱، ۳، ۵، ۷ و ۹ میلیمتر از خط ذوب قرار داشتند) ب- تغییرات حد اکثر درجه حرارت (پاس پنجم) بر حسب فاصله از خط ذوب برای آلیاژ ۸۰۰.....۹۷

شکل ۴-۳۷ الف-تغییرات درجه حرارت بر حسب زمان در فواصل مختلف از خط ذوب (برای ترموکوپلهای شماره۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ که به ترتیب در فواصل ۱، ۳، ۵، ۷ و ۹ میلیمتر از خط ذوب قرار داشتند) ب- تغییرات حد اکثر درجه حرارت (پاس پنجم) بر حسب فاصله از خط ذوب برای فولاد HP.....۹۸
شکل ۴-۳۸ تغییرات درجه حرارت بر حسب زمان در فاصله ثابت یک میلیمتر از خط ذوب و حرارت‌های ورودی مختلف الف- آلیاژ ۸۰۰ ب- فولاد HP.....۹۹
شکل ۴-۳۹ پروفیل سختی در طرفین خط ذوب در حرارت‌های ورودی مختلف الف- فولادHP ریختگی ب- آلیاژ ۸۰۰ پیر شده.....۱۰۱
شکل٤-٤٠-ساختار نواحی مختلف جوش بین فلز جوش اینکونل ۱۸۲ با الف- آلیاژ ۸۰۰ ب- فولاد HP ریختگی.....۱۰۲
شکل٤-٤١-ساختار نواحی مختلف جوش بین فولاد زنگ نزن ۳۰۹ و فلزات پایه الف و ب- فصل مشترک جوش با آلیاژ ۸۰۰ ج و د- فصل مشترک جوش با فولاد HP ریختگی.....۱۰۳
شکل ۴-۴۲ نمایش شماتیک از رشد اپی تکسیال و رشد رقابتی در نزدیکی‌های مرز ذوب به طرف فلز جوش.....۱۰٤
شکل ۴-۴۳ -نتایج آنالیز EDS از ناحیه ذوب شده بین فلز پایه فولاد HP و فلز جوش زنگ نزن ۳۰۹ .....۱۰۴
شکل۴-۴۴ الف- فصل مشترک فلز پایه فولاد HP با فلز جوش اینکونل۶۱۷ ب-آنالیز EDS رسوبات در ناحیه متاثر از حرارت فولاد HP ج- فصل مشترک فلز پایه آلیاژ۸۰۰ با فلز جوش اینکونل۶۱۷ د- تصویر میکروسکوپ الکترونی از رشد اپی‌تکسیال فصل مشترک فلزپایه آلیاژ ۸۰۰با فلز جوش اینکونل۶۱۷ .....۱۰۵
شکل ۴-۴۵ - فصل مشترک آلیاژ ۸۰۰ پیر شده با فلزات جوش مختلف الف اینکونل ۱۸۲ ب- زنگ نزن۳۰۹ ج-اینکونل۶۱۷ .....۱۰۶
شکل ۴-۴۶ تغییرات ضریب انبساط حرارتی فلزات پایه و جوش در دماهای مختلف.....۱۰۷
شکل ۴-۴۷ نتایج آزمایش حساسیت به ترک داغ برای فلزات پرکننده (آزمایش وارسترینت.).....۱۰۸
شکل ۴-۴۸ - اثر دمای بین پاسی بر فلز جوش اینکونل ۸۲ و ناحیه متاثر از حرارت آلیاژ ۸۰۰ الف- دمای بین پاسی درجوشکاری پیوسته ب- دمای بین پاسی در $25\ ^{\circ}C$ (دمای محیط)... ۱۰۹

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول۲-۱- بعضی از کاربردهای سوپر آلیاژها در صنایع مختلف..... ۱۱
جدول۲-۲ ترکیب شیمیایی گریدهای مختلف آلیاژ ۸۰۰ ..... ۱۶
جدول۲-۳ ثابت های فیزیکی و خواص حرارتی آلیاژ ۸۰۰ ..... ۱۶
جدول۲-۴ روند تغییر خواص فیزیکی با دما ۱۷
جدول ۲-۵ محدوده خواص مکانیکی کوتاه مدت آلیاژ ۸۰۰ ..... ۱۸
جدول۲-۶ خواص کششی و سختی آلیاژ ۸۰۰ در دماهای مختلف ۱۸
جدول۲- ۷ مقایسه خواص کششی و فشاری آلیاژ ۸۰۰ ..... ۱۹
جدول۲- ۸ استحکام خزشی آلیاژ ۸۰۰ در دمای محیط و در شرایط مختلف تولید و عملیات حرارتی..... ۱۹
جدول۲- ۹ استحکام خزشی آلیاژ ۸۰۰ در حالت کشش سرد و آنیل شده در دماهای مختلف..... ۱۹
جدول ۲-۱۰- مشخصه و ترکیب شیمیایی گریدهای استاندارد فولادها ی ریختگی مقاوم به حرارت..... ۲۶
جدول ۲-۱۱- مشخصه و ترکیب شیمیایی گریدهای غیر استاندارد فولادها ی ریختگی مقاوم به حرارت ۲۷
جدول۲-۱۲- خواص فولادهای مقاوم به حرارت در دماهای پایین..... ۳۲
جدول۲-۱۳- ضریب انبساط حرارتی و هدایت حرارتی فولادهای مقاوم به حرارت در دماهای مختلف..... ۳۲
جدول۲-۱۴-فازهای بدست آمده از فولاد HP با درصدهای مختلف نیوبیوم در شرایط متفاوت.... ۳۹
جدول۲-۱۵- آزمایش‌های جوش‌پذیری مورد استفاده برای ارزیابی حساسیت به ترک خوردن داغ ۲۴
جدول ۳-۱. ترکیب شیمیایی فلزات پایه و فلزات پر کننده استفاده شده (درصد وزنی)..... ۶۵
جدول۳-۲-مشخصات جوشکاری نمونه ها..... ۶۷
جدول۳-۳ ابعاد نمونه های آزمایش کشش (mm)..... ۶۹
جدول ٤-۱-خواص مکانیکی فلزات پایه قبل و بعد از پیر شدن..... ۹۶
جدول ٤-۲-خواص مکانیکی فلزات جوش..... ۹۶
جدول٤-۳- تاثیر درجه حرارت عملیات حرارتی بر خواص مکانیکی آلیاژ ۸۰۰..... ۹۸
جدول ٤-٤- تاثیر درجه حرارت عملیات حرارتی بر خواص مکانیکی فولاد HP..... ۹۸

چکیده

سوپر آلیاژ اینکولوی ۸۰۰ و فولاد مقاوم به حرارت HP به دلیل استحکام بالا و مقاومت عالی به خوردگی و اکسیداسیون در دماهای بالا کاربردهای متنوعی را در صنایع گوناگون پیدا کرده و اتصال آنها اهمیت یافته است. در این پژوهش ابتدا تغییرات ریزساختاری و خواص مکانیکی دو آلیاژ اینکولوی ۸۰۰ و فولادHP قبل و بعد از قرار گرفتن طولانی مدت درمعرض دماهای بالا مورد بررسی قرار گرفت. بررسی‌های ریز ساختاری با استفاده از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپهای الکترونی SEM وTEM مجهز به سیستم آنالیز شیمیایی (EDS) انجام شد. دو آلیاژ در شرایط مختلف با استفاده از روش جو.شکاری قوسی-تنگستن با گاز محافظ (GTAW) جوشکاری شدند. سپس تاثیر پیر شدن دو آلیاژ بر جوش‌پذیری آنها و خواص و ساختار منطقه جوش و ناحیه متاثر از حرارت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که پیر شدن باعث کاهش جوش پذیری و ایجاد ترک در ناحیه متاثر از حرارت آنها گردیده است. در ادامه اثرات متغیرهای حرارت ورودی، دمای بین پاسی، نوع فلز پرکننده و عملیات حرارتی آنیل انحلالی قبل از جوشکاری بر ریز ساختار و خواص اتصال غیر مشابه دو آلیاژ مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفت. مشخص شد که عملیات آنیل انحلالی نسبت به متغیرهای دیگر دارای بیشترین تاثیر بر خواص اتصال فوق بوده و باعث برگشت ساختار میکروسکوپی به حالت اولیه قبل از پیر شدن و بهبود انعطاف پذیری و مقاومت به ضربه هر دو آلیاژ شده است. نتایج نشان داد که پس از انجام عملیات آنیل انحلالی، جوش پذیری دو آلیاژ بهبود یافته و اثری از ترک در منطقه جوش یا ناحیه متاثر از حرارت مشاهده نشد. حساسیت به ترک داغ فلزات پایه وجوش با استفاده از آزمایش وارسترینت مورد ارزیابی قرار گرفت. مشخص شد که در اثر پیر شدن، حساسیت به ترک داغ افزایش یافته در صورتی که آنیل انحلالی میزان حساسیت به ترک داغ هر دو فلز را به میزان قابل توجهی کاهش داده است. نتایج همچنین نشان داد که فلز پر کننده اینکونل ۸۲ دارای کمترین حساسیت به ترک داغ و فلزات پر کننده اینکونل ۶۱۷ و فولاد زنگ نزن ۳۰۹ دارای بیشترین حساسیت به ترک داغ هستند. پژوهش انجام شده نشان داد که جوشکاری غیرمشابه اینکولوی ۸۰۰ به فولاد مقاوم به حرارت HP تحت شرایط آنیل انحلالی قبل از جوشکاری، حرارت ورودی مناسب(J/mm-۹۳۵-۸۲۰)، دمای بین‌پاسی پایین (کمتر از ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد) و استفاده از فلزات پرکننده اینکونل ۸۲ و اینکونل ۶۱۷ می‌تواند با موفقیت انجام گردد.

فصل اول
مقدمه

سوپرآلیاژها موادی هستند که بر پایه عناصری نظیر آهن، نیکل و کبالت و کرم برای کار در دماهای بالا، در شرایطی که هم استحکام و هم مقاومت به خوردگی مورد نیاز است استفاده می‌شوند. پس از گذشت شش دهه هنوز هم سوپرآلیاژها با دوام‌ترین و تجاری‌ترین مواد برای کار در دماهای بالا مثل موتور پرتنش هواپیما و توربین‌های گازی صنعتی هستند. به طور کلی سوپرآلیاژها از نظر ترکیب شیمیایی به سه گروه پایه آهن-نیکل، پایه نیکل و پایه کبالت تقسیم می‌شوند. مهمترین خواص سوپرآلیاژها دارا بودن استحکام مناسب در دماهای بالای ۵۴۰ درجه سانتی گراد و مقاومت به خزش، خوردگی داغ و سایش می‌باشد. به همین دلیل امروزه سوپرآلیاژها کاربردهای گسترده ای را در صنایع گوناگون از جمله صنایع نفت و گاز ، پتروشیمی، پالایشگاه، هوا فضا و تجهیزات پزشکی پیدا کرده اند [۴-۱].
فولادهای ریختگی مقاوم به حرارت دسته‌ای از آلیاژهای ریختگی هستند که دارای تحمل کار مداوم یا متناوب در دماهای بالاتر از ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشند[۵]. این دسته از فولادها بر اساس سه عنصر آهن، کرم و نیکل ایجاد شده‌اند و دارای ساختار کاملا آستنیتی یا ساختار آستنیتی به همراه کمی فریت هستند. این فولادها به دلیل مقدار کرم بالای آنها، مقاومت خوبی به خوردگی و اکسیداسیون و سولفیده شدن از خود نشان می‌دهند. وجود مقدار بالای نیکل در آنها باعث افزایش مقاومت در مقابل خزش و شوک حرارتی می‌گردد. مجموعه این خواص باعث شده که این فولادها بتوانند در محیط‌های حاوی هوا، گازهای خروجی گوگرد دار و بدون گوگرد مقاوم باشند [۷، ۶].
اینکولوی ۸۰۰ یا به اختصار آلیاژ ۸۰۰، یک سوپرآلیاژ پایه آهن استحکام یافته با محلول جامد است که حضور کاربید ها در زمینه آستنیتی این آلیاژ به افزایش استحکام آن کمک می کند. مقاومت عالی در برابر ترک خوردن خوردگی- تنشی در محیط‌های حاوی کلر یکی از ویژگی‌های مهم این آلیاژ است. مقدار زیاد کرم این آلیاژ سبب ایجاد مقاومت خوب در برابر اکسید شدن می شود[۹ ،۸].

فولاد HP از جمله فولادهای مقاوم به حرارت است که در خانواده فولادهای مقاوم به حرارت آهن-نیکل-کرم قرار می‌گیرد. این فولاد قابلیت سختکاری توسط عملیات حرارتی را نداشته و معمولا در حالت ریختگی به کار می رود. این آلیاژ درشرایط ریختگی دارای انعطاف‌پذیری مناسبی است و به دلیل درصد بالای عناصر آلیاژی در محیطهای کربوره‌کننده و اکسیدکننده مقاوم است[۵]. فولاد HP در تمام دماها آستنیتی بوده و به دلیل درصد نیکل بالای آن حساس به تشکیل فاز سیگما نیست[۱۰ ،۵]. هنگامی که این آلیاژ در معرض دمای بالا قرار می‌گیرد به دلیل رسوب فازهای ثانویه و تغییر مورفولوژی کاربیدهای یوتکتیک اولیه، انعطاف‌پذیری و جوش‌پذیری آن در دماهای پایین کاهش یافته و استحکام و مقاومت خزشی آن افزایش می‌یابد[۱۳ ،۱۲ ،۱۱]. نسل‌های جدید این فولاد با افزودن عناصر آلیاژی کاربیدزای قوی مثل تیتانیوم و نیوبیوم توسعه یافته‌اند که آنها را فولادهایHP اصلاح شده می‌نامند. افزودن این عناصر مقاومت خزشی را بهبود بخشیده و کاربیدهای کرم را توسط کاربیدهای پایدارتری مثل کاربید تیتانیوم (TiC) و کاربید نیوبیوم (NbC) جایگزین نموده است[۱۷-۱۴ ،۶]. خواص دمای بالای عالی دو آلیاژ باعث شده که کاربردهای متنوع و گسترده ای را در صنایع مختلف از جمله صنایع نفت، گاز، پتروشیمی و پالایشگاه پیدا کنند [۱۹ ،۱۸ ،۹ ،۷ ،۴].

با وجود اهمیت و کاربرد گسترده این دو آلیاژ در دماهای بالا گزارشات کمتری در ارتباط با متالورژی و جوشکاری و جوش پذیری آنها بویژه تأثیر پارامترهای جوشکاری بر ساختار و خواص منطقه جوش و منطقه متاثر از حرارت ونیز اثرات قرارگیری طولانی مدت آنها در معرض دماهای بالا بر ساختار و خواص آلیاژ صورت گرفته است[۴].

جوش‌پذیری بویژه برای آلیاژهای غیر مشابه از اهمیت زیادی برخوردار است. توسعه سریع و روز افزون تکنولوژی و نیاز به استفاده و جایگزین نمودن مواد اولیه جدید و نیز در نظر گرفتن مسائل اقتصادی، در بسیاری از موارد نیاز به جوشکاری فلزات و آلیاژها به یکدیگر و ضرورت اتصال یک آلیاژ نو به آلیاژهایی که قبلا در سرویس بوده است (آلیاژهای پیرشده) را افزایش داده است. در بسیاری از موارد نیز به دلیل تعمیر، تعویض و جایگزینی مواد اولیه استفاده شده، استفاده از جوشکاری بویژه در حالت فلزات و آلیاژهای غیر مشابه اجتناب ناپذیر است. در اتصالات غیر مشابه انتخاب فلز پرکننده‌ای که بتواند اتصال مناسبی را بین دو آلیاژ ایجاد کند از اهمیت بالایی برخوردار است. فلز پرکننده مناسب می‌تواند نقش موثری را در طول عمر و خواص اتصال غیر مشابه داشته باشد. با توجه به وجود صنایع متعدد بویژه صنایع نفت و گاز در ایران و استفاده وسیع از سوپرآلیاژها و فولادهای مقاوم به حرارت در این صنایع و نیز نیاز به تعمیر، تعویض و نوسازی آنها، استفاده از جوشکاری بویژه در حالت غیرمشابه اجتناب ناپذیر است. اخیرا شرکت پالایش نفت اصفهان (پالایشگاه اصفهان) تصمیم به تعویض و جایگزین نمودن بخشی از لوله های از جنس فولاد مقاوم به حرارت HK توسط فولاد مقاوم به حرارت HP گرفته است. این جایگزینی مستلزم جوشکاری غیر مشابه فولاد HP به سوپر آلیاژ اینکولوی ۸۰۰ است. بررسی‌ها نشان داده است که اینکولوی ۸۰۰ قبل از پیر شدن از جوش‌پذیری مناسبی برخوردار است، در صورتی که از جوش‌پذیری این آلیاژ در حالت پیر شده (پس از کار کردن طولانی مدت در سرویس) گزارشات کمتری ارایه گردیده است [۱۳ ،۲ ،۱]. در پژوهش حاضر جوشکاری غیر مشابه اینکولوی ۸۰۰ به فولاد مقاوم به حرارتHP (در شرایط مختلف قبل از پیر شدن، بعد از پیر شدن و پس از

عملیات حرارتی آنیل انحلالی) با استفاده از فلزات پرکننده اینکونل ۸۲، اینکونل ۱۸۲، اینکونل ۶۱۷ و فولاد زنگ نزن ۳۰۹ و در حرارت‌های ورودی متفاوت مورد بررسی و ارزیابی قرارگرفته است. همچنین تاثیر عملیات حرارتی آنیل انحلالی قبل از جوشکاری بر خواص اتصال آلیاژهای فوق در شرایط پیر شده مورد بررسی قرار گرفته است.

فصل دوم
مرور مطالعاتی

۲-۱ سوپر آلیاژها

۲-۱-۱-مقدمه

سوپرآلیاژها دسته‌ای از آلیاژهای مهندسی هستند که برای کار در دماهای بالاتر از ۵۴۰ درجه سانتیگراد استفاده می‌شوند. این دسته از آلیاژها به سه گروه پایه آهن-نیکل، پایه نیکل و پایه کبالت تقسیم می‌شوند [۱،۲،۳،۲۰،۲۱]. پس از گذشت شش دهه از معرفی سوپر آلیاژها، این آلیاژها با دوام‌ترین مواد برای کار در دماهای بالا بویژه در شرایطی که همزمان نیاز به مقاومت به خوردگی و تنش وجود داشته باشد، شناخته شده اند. استفاده از این آلیاژها در موتورهای پر تنش هواپیما و توربین‌های گازی دلیلی بر این مدعا است [۲،۳].

با تقسیم قرن گذشته به دوره های بیست ساله تصویر مناسب و کاملی از سوپر آلیاژها شکل می‌گیرد. در قرن بیستم افزودن کرم به فلزات انتقالی نظیر آهن، نیکل و کبالت باعث اثرات اعجاب آوری بر مقاومت خوردگی آنها در محیطهای آبی و گازی گردید. اندکی پس از پیدایش فولادهای زنگ نزن سیم‌های مقاوم به حرارت از جنس آلیاژهای پایه نیکل و پایه کبالت مقاوم به حرارت و مقاوم به سایش بوجود آمدند. در واقع پانزده تا بیست سال پس از تولید فولادهای زنگ نزن در دهه ۱۹۲۰ آلیاژهای نیکروم[1] و استلایت[2] در دسترس قرار گرفتند [۲]. در اواخر دوره بیست ساله دوم و با شروع جنگ جهانی دوم پایه سوپرآلیاژهای امروزی با توسعه طیف وسیعی از فولادهای زنگ

[1] - Nichrom
[2] - Stellite

نزن گذاشته شد و آلیاژهای پایه کبالت وایتالیوم[1] و آلیاژهای نیکروم قوی‌تری با نام‌های تجاری اینکونل[2] و نیمونیک[3] توسط شرکتهای بین المللی نیکل معرفی شدند [۲]. از سال ۱۹۴۰ تا ۱۹۶۰ به دلیل نیاز به سوپر آلیاژهای استحکام بالا و مقاوم در دماهای بالا مثل توربین‌های گازی و موتور هواپیما پیشرفت‌های اساسی در این سوپر آلیاژها صورت گرفت. توسعه فن‌آوری ذوب در خلاء سوپر آلیاژها جهش بزرگی را در توانایی سوپر آلیاژها ایجاد نمود. این تحول مهم سبب کاهش اکسیژن و نیتروژن و افزایش استحکام سوپرآلیاژها گردید و بازدهی افزودنی های استحکام بخش نظیر تیتانیوم و آلومینیوم را بهبود بخشید. از اواسط دهه ۱۹۶۰ تحقیقات زیادی در ارتباط با مقاومت در دماهای بالاتر بر روی سوپرآلیاژهای پایه نیکل شروع شد[۲]. چهار دهه آخر قرن گذشته عصر طلایی در توسعه سوپرآلیاژها بوده است. در این دوره صدها ترکیب شیمیایی از سوپرآلیاژها مورد تحقیق و مطالعه قرار گرفتند و تعداد زیادی از آنها کاربرد تجاری پیدا کردند. در پایان دوره بیست ساله چهارم نه تنها آلیاژهای انجماد جهت دار یافته دانه ستونی در توربین‌های گازی بکار گرفته شدند بلکه آلیاژهای ریختگی بلوری انجماد جهت‌دار یافته نیز تولید شدند[۲]. نسل دوم آلیاژهای انجماد جهت‌دار یافته دانه ستونی و نسل اول آلیاژهای تک بلوری انجماد جهت‌دار یافته مانند PWA 1484 از نسل اول این آلیاژها یعنی PWA 1480 تولید شدند.

امروزه سوپر آلیاژها از مهمترین آلیاژهای مهندسی جهت کاربرد در دماهای بالا هستند که در صنایع مختلفی از جمله صنایع نفت و گاز و پتروشیمی و پالایشگاه، صنایع هوا فضا و تجهیزات پزشکی کاربرد یافته‌اند. استفاده از پوشش‌های سطحی جهت بهبود آسیب‌های خوردگی باعث افزایش طول عمر سوپر آلیاژها گردیده و کاربردهای تجاری آنها را به طور فزاینده‌ای افزایش داده است و به نظر می رسد که در آینده مورد توجه بیشتری قرارگرفته و استفاده وسیع‌تری پیدا کنند [۲،۴].

۲-۱-۲-معرفی سوپر آلیاژها

چنانکه در مقدمه اشاره شده است، سوپرآلیاژها دسته‌ای از آلیاژهای مهندسی هستند که برای کار در دماهای بالاتر از ۵۴۰ درجه سانتیگراد طراحی شده اند. این آلیاژها معمولا برای کار در دماهای بالا تا نزدیکی‌های نقطه ذوب مناسب هستند [۱، ۲، ۳]. سوپر آلیاژها معمولا به دو شکل ریختگی (معمولا عملیات حرارتی شده یا تحت فرایندهای دیگر قرار گرفته) یا کار شده (معمولا عملیات حرارتی شده یا تحت فرایندهای دیگر قرار گرفته) تولید و مورد استفاده قرار می‌گیرند. اغلب سوپر آلیاژهای ریختگی از نوع چند بلوری با دانه های هم محور و بعضی دیگر از انواع انجماد جهت دار یافته هستند. آلیاژهای ریختگی نسبت به آلیاژهای کار شده استحکام بیشتری در دماهای بالا دارند و بیشتر در محدوده دمایی کاری بالا (از ۸۱۶ درجه سانتیگراد تا نقطه ذوب) مورد استفاده قرار می‌گیرند. ترکیب شیمیایی آلیاژ ریختگی به طور مؤثری تعیین کننده استحکام دمای بالای آنها است. در بین سوپرآلیاژها، سوپر آلیاژهای پایه نیکل ریختگی دارای بالاترین استحکام گسیختگی خزشی در دماهای بالا هستند. به همین دلیل از آنها برای کار در پره‌های هوا و توربین‌های گازی در شرایط دمای بالا و تنش زیاد استفاده می شود. آلیاژهای کار شده به مراتب همگن‌تر از

---

[1] - Vitalium
[2] -Inconel
[3] - Nimonic

آلیاژهای ریختگی می‌باشند، زیرا آلیاژهای ریختگی معمولا دارای جدایش ناشی از فرایند انجماد هستند. این آلیاژها معمولا انعطاف‌پذیر تر از آلیاژهای ریختگی هستند و انعطاف‌پذیری آنها باعث می‌شود که بتوان آنها را به اشکال بهتری تبدیل کرد. هرآلیاژی را نمی‌توان به شکل کار شده در آورد و بعضی قطعات فقط به شکل ریختگی تولید می‌شوند. آلیاژهایی که کارپذیری کمی دارند ابتدا با متالورژی پودر تولید شده و سپس آهنگری می‌شوند. قطعات آهنگری نیز محصولات کار شده می‌باشند که مزیت انعطاف‌پذیری بالاتر ماده کار شده برای تولید اشکال بزرگتر مانند دیسک‌های توربین گازی را دارند. از آلیاژهای کار شده معمولا در محدوده دمایی متوسط (از ۵۴۰ تا ۷۶۰ درجه سانتی گراد استفاده می‌شود)[۱،۲،۳]. استحکام دهی سوپر آلیاژها معمولا توسط سخت کاری محلولی (تشکیل محلول جامد)، کار سختی (که معمولا در اثر کار در دماهای بالا این استحکام از دست می‌رود) و رسوب سختی (تشکیل فازهای ثانویه در زمینه اصلی) افزایش می‌یابد. همچنین ایجاد کاربیدهای ثانویه بویژه در سوپرآلیاژهای پایه کبالت افزایش استحکام را در پی دارد[۱،۲، ۳، ۲۰].

۲-۱-۳-انواع سوپر آلیاژها

به طوری که در مقدمه عنوان گردید سوپرآلیاژها به سه گروه پایه آهن- نیکل، پایه نیکل و پایه کبالت تقسیم می-شوند که هر کدام از این گروه ها از نظر ماکروسکوپی به دو نوع ریختگی و کارشده (شامل آلیاژهای متالورژی پودر) تقسیم می‌شوند، علاوه بر ساختار ماکروسکوپی (درشت ساختار)، ساختار بلوری (ساختار اتمی) و ریز ساختار (در مقیاس میکروسکپی) نیز وجود دارند[۱،۲].

۲-۱-۳-۱-سوپرآلیاژهای پایه آهن-نیکل

این دسته از سوپرآلیاژها دارای زمینه آستنیتی با ساختار اتمی FCC و فازهای ثانویه مختلفی هستند. مهمترین آلیاژهای این گروه آلیاژهای استحکام یافته با رسوبات ترکیبات بین فلزی در زمینه آستنیتی هستند. عمومی‌ترین رسوب فاز گاما پرایم(γ') است که درآلیاژهایی مثل Incoloy 901,V-57 یا A-286 دیده می‌شود.آلیاژهایی مانند اینکونل IN-718 که دارای فازهای رسوبی گاما پرایم(γ') و گاما زگوند(γ'') هستند، قبلا جزو دسته سوپرآلیاژهای پایه آهن- نیکل بودند ولی اکنون در گروه سوپرآلیاژهای پایه نیکل قرار دارند. سوپرآلیاژهای دیگر پایه آهن-نیکل شامل فولادهای زنگ نزن اصلاح شده در ابتدا با محلول جامد استحکام می یافتند. این دسته از سوپرآلیاژهای پایه آهن-نیکل از آلیاژ 19-9DL (فولاد زنگ نزن و کمی آلومینیوم و تیتانیوم جهت تشکیل فاز گاماپرایم(γ')) تغییر می‌کنند. این دسته از سوپرآلیاژها در حال حاضر به صورت کار شده مورد استفاده قرار می‌گیرند[۱].

۲-۱-۳-۲-سوپر آلیاژهای پایه نیکل

زمینه این دسته از سوپر آلیاژها، آستنیتی با شبکه کریستالی FCC است که فازهای ثانویه مختلفی در آنها وجود دارد. این دسته از سوپر آلیاژها سخت شده با محلول جامد هستند ولی مهمترین آلیاژهای این گروه دارای رسوبات ترکیبات بین فلزی در زمینه FCC هستند. در آلیاژهای حاوی تیتانیوم و آلومینیوم مانند آلیاژهای کار شده Astroloy, U-700, U-720, Waspaloy و آلیاژهای ریختگی مانندAR-M-200, Rene 80, IN-713