

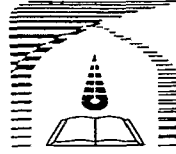
١٧٧١/١٠٨٧٢
٨٨٢١٥

٢٩٨٧
٤٠



١٠٩٩١٥

۸۷/۱/۱۰۸۷۹۲
۸۸-۲-۵



دانشگاه تربیت مدرس

دانشگاه تربیت مدرس

دانشکده فنی و مهندسی

بخش مهندسی مواد - گروه شناسایی و انتخاب مواد

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی مواد - شناسایی و انتخاب مواد

بررسی جوش پذیری سوپرآلیاژ پایه نیکل Inconel 713LC

امیررضا فرنی

استاد راهنما:

دکتر فرشید مالک قایینی

استاد مشاور:

دکتر امیر عبدالله زاده

۱۳۸۸ / ۱ / ۱۱

شهریور ۱۳۸۶

۱۰۹۹۸۵



بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان

آقای امیررضا فرنیبا پایان نامه ۸ واحدی خود را با عنوان بررسی جوش پذیری سوپرآلیاژ پایه نیکل Inconel ۷۱۳LC در تاریخ ۱۳۸۶/۶/۲۵ ارائه کردند. اعضای هیات داوران نسخه نهایی این پایان نامه را از نظر فرم و محتوا تایید کرده و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد مهندسی مواد - شناسائی پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر فرشید مالک قائینی	استادیار	
استاد مشاور	دکتر امیر عبدالله زاده	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر حمید رضا شاهوردی	استادیار	
استاد ناظر	دکتر امیر حسین کوکبی	استاد	
مدیر گروه (یا نماینده گروه تخصصی)	دکتر حمید رضا شاهوردی	استادیار	

۱۳۸۸ / ۱ / ۱۴

این نسخه به عنوان نسخه نهایی پایان نامه / رساله مورد تایید است.
 اعضای استاد راهنما:



آیین‌نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی دانشگاه

تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی و فناوری دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیأت علمی، دانشجویان، دانش‌آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد زیر را رعایت نمایند:

ماده ۱- حق نشر و تکثیر پایان‌نامه/ رساله و درآمدهای حاصل از آنها متعلق به دانشگاه می باشد ولی حقوق معنوی پدید آورندگان محفوظ خواهد بود.

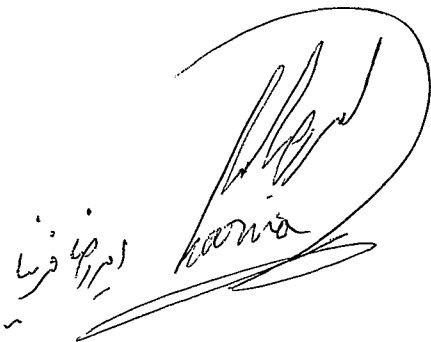
ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان‌نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و با تایید استاد راهنمای اصلی، یکی از اساتید راهنما، مشاور و یا دانشجوی مسئول مکاتبات مقاله باشد. ولی مسئولیت علمی مقاله مستخرج از پایان‌نامه و رساله به عهده اساتید راهنما و دانشجو می باشد.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش‌آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه/ رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب و یا نرم افزار و یا آثار ویژه حاصل از نتایج پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی کلیه واحدهای دانشگاه اعم از دانشکده ها، مراکز تحقیقاتی، پژوهشکده ها، پارک علم و فناوری و دیگر واحدها باید با مجوز کتبی صادره از معاونت پژوهشی دانشگاه و براساس آئین‌نامه های مصوب انجام شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه یافته ها در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق معاونت پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این آیین‌نامه در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۸۷/۴/۱ در شورای پژوهشی و در تاریخ ۸۷/۴/۲۳ در هیأت رئیسه دانشگاه به تایید رسید و در جلسه مورخ ۸۷/۷/۱۵ شورای دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب در شورای دانشگاه لازم‌الاجرا است.



امیر فرزا

آیین نامه چاپ پایان نامه (رساله) های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله) های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه، دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله) ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان نامه کارشناسی ارشد / رساله دکتری نگارنده در رشته **مدرس‌ساز** است که در سال ۱۳۸۶ در دانشکده **فنی و مهندسی** دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی سرکار

خطم/جناب آقای دکتر فرید مالد مائین، مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر **ایر عبدالمزارع** و مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر _____ از آن

دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت چاپ) را به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر در معرض فروش قرار دهد.

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده رابه عنوان خسارت به دانشگاه تربیت مدرس، تأدیبه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب **ایر رضا فرنا** مقطع **کارشناسی ارشد** دانشجوی رشته **مدرس‌ساز - شناسایی و ارزیابی معیار**

تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: **ایر رضا فرنا**

تاریخ و امضا:



تقدیم به پدر و مادر عزیزم

اسوه های صبر و ایثار

و امام میهنم ایران

تشکر و قدردانی

پروردگار مَنان را سپاس می‌گویم که به لطف و مددش موفق به اتمام این پروژه و در پی آن این دوره تحصیلی گشته‌ام. همچنین بر خود واجب می‌دانم از تمام بزرگوارانی که در این مسیر همراهم بوده‌اند، تشکر نمایم. پیش از همه تشکر ویژه‌ای دارم از استاد ارجمندم جناب آقای دکتر فرشید مالک به خاطر زحمات، راهنمایی‌ها و کمک‌هایشان. چه بسا بدون راهنمایی‌های استادانه و دلسوزی‌های پدرانۀ ایشان، انجام این پروژه مقدور نبود. همچنین از جناب آقای دکتر امیرعبداله‌زاده، که در طول کار از مشورت با ایشان استفاده فراوانی بردم، نیز کمال امتنان و سپاس را دارم.

بدینوسیله مراتب سپاس و تشکر خود را از عزیزانم در صنایع ریخته‌گری شهید جهان‌آرا (صنایع مکانیک) بویژه جناب آقایان مهندس اسلامی و مهندس نوروزی و نیز شرکت پایاپرتو بویژه جناب آقایان دکتر صباغزاده و مهندس ترکمنی به خاطر حمایت‌های بی‌شائبه‌شان اعلام می‌دارم.

از دوست و برادر عزیزم آقای مهندس مجتبی منتظری نیز نهایت سپاس را دارم که در تمام مراحل با حضوری روحیه‌بخش در کنارم بود. همچنین از تمام دوستانم در واحد R&D صنایع شهید جهان‌آرا بخصوص دوست خوبم آقای مهندس حسین انصاری در آزمایشگاه متالوگرافی که نهایت همکاری را با بنده داشتند، تشکر می‌کنم.

امیررضا فرنیا

تایستان ۱۳۸۶

چکیده:

سوپر آلیاژهای پایه نیکل استحکام یافته با رسوبات γ' استعداد بالایی به ترکیدگی در حین جوشکاری دارند. آلیاژ Inconel 713LC یک سوپر آلیاژ ریختگی پایه نیکل کم کربن است که معمولاً بدون انجام هرگونه عملیات حرارتی استفاده می شود. از آن جا تولید این قطعات بسیار هزینه بر می باشد، لذا تعمیر قطعات معیوب به وسیله جوشکاری - چه در حین تولید و چه در حین سرویس - می تواند در صورت امکان از ارزش افزوده بالایی برخوردار باشد. در این تحقیق از دو روش جوشکاری GTAW و جوشکاری لیزر استفاده شد. بررسی جوشپذیری این آلیاژ و پاسخ آن به ذوب و انجماد از طریق بررسی ترکیدگی و ریزساختار با اعمال روش ها و پارامترهای مختلف جوشکاری GTAW و لیزر پالسی و ایجاد شرایط ساختاری متفاوت قبل از جوشکاری از طریق عملیات حرارتی انحلالی و کنترل نرخ سرد شدن از طریق پیشگرم در دستور کار قرار گرفت. نتایج بررسی ها نشان داد که با کاهش حرارت ورودی ترکها از ناحیه متاثر از جوش به داخل فلز جوش شیفیت پیدا می کنند. ترکیبات غنی از Nb و Zr به عنوان آخرین اجزای انجمادی در حوضچه مذاب معرفی گردید و ذوب ترکیبی کاربیدهای NbC عامل اصلی در ترکیدگی HAZ شناخته شد. همچنین افزایش توان متوسط در جوشکاری لیزر باعث کاهش در ترکیدگی انجمادی و حفرات گردید. افزایش سرعت جوشکاری در جوشکاری لیزر باعث افزایش ترکیدگی انجمادی و حفرات شد. اجرای عملیات حرارتی انحلالی پیش از جوشکاری باعث کاهش ترکیدگی انجمادی در جوشهای لیزر شد. انجام پیشگرم باعث کاهش ترکیدگی انجمادی و حفرات در جوشهای لیزر شد. در جوشکاری لیزر عرض HAZ در حدود چند ده میکرون تخمین زده شد و ترکی در این ناحیه مشاهده نشد.

واژه های کلیدی: جوشکاری GTAW، جوشکاری لیزر، سوپرآلیاژ، Inconel 713LC، ترک گرم، جوش پذیری

فهرست عناوین

عنوان	صفحه
فصل اول: مقدمه.....	۱
فصل دوم: مروری بر منابع.....	۵
۱-۲- بررسی ریزساختار سوپر آلیاژهای پایه نیکل.....	۵
۲-۲- کلیاتی در مورد جوشکاری سوپر آلیاژها.....	۲۰
۳-۲- آماده سازی برای جوشکاری.....	۲۱
۴-۲- فلزپرکننده.....	۲۲
۵-۲- مشکلات همراه با جوشکاری سوپر آلیاژها.....	۲۳
۶-۲- انحلال رسوبات و افت استحکام در جوشکاری سوپر آلیاژهای پایه نیکلی رسوب سخت.....	۲۴
۷-۲- میکروساختار HAZ.....	۲۶
۸-۲- عملیات حرارتی پیش از جوش.....	۲۷
۹-۲- روشهای جوشکاری.....	۲۷
۱۰-۲- جوشکاری تعمیراتی.....	۲۹
۱۱-۲- جوشکاری تعمیراتی پره های توربین.....	۳۱
۱۲-۲- جوش پذیری سوپر آلیاژها.....	۳۵
۱-۱۲-۲- دیاگرام های ارزیابی جوش پذیری.....	۳۶
۲-۱۲-۲- تست داکتیلیته گرم.....	۳۸
۱۳-۲- توالی انجام در آلیاژ IN713LC.....	۴۴
۱۴-۲- ترک گرم در سوپر آلیاژها.....	۴۹
۱-۱۴-۲- ترکیبگذاری انجامی.....	۴۸
۲-۱۴-۲- ترکیبگذاری ذوبی در HAZ.....	۶۳
۱۵-۲- ترکیبگذاری پیرکرنشی.....	۸۱
فصل سوم: روش انجام تحقیق.....	۸۳
۱-۳- مقدمه.....	۸۳
۲-۳- بررسی ریزساختار سوپر آلیاژ ریختگی IN713LC.....	۸۳
۳-۳- تهیه نمونه ها.....	۸۴
۴-۳- اجرای فرآیند جوشکاری GTAW در اتمسفر محافظ.....	۸۵
۵-۳- انجام عملیات حرارتی آنیل انحلالی.....	۸۶
۶-۳- اجرای فرآیند جوشکاری لیزر پالسی.....	۸۷
۷-۳- بررسیهای متالوگرافی نمونه های جوشکاری و عملیات حرارتی شده.....	۸۹
۸-۳- بررسی آماری ترکها و حفرات ایجاد شده در جوش.....	۹۰

فهرست عناوین

صفحه	عنوان
۹۱.....	فصل چهارم: نتایج و بحث.....
۹۱.....	۱-۴- بررسی ریز ساختار آلیاژ IN713LC.....
۹۹.....	۲-۴- ساختارهای عملیات حرارتی شده.....
۹۹.....	۱-۲-۴- نمونه های عملیات حرارتی شده انحلالی در 1120°C
۱۰۰.....	۲-۲-۴- نمونه های عملیات حرارتی شده انحلالی در 1150°C
۱۰۱.....	۳-۲-۴- نمونه های عملیات حرارتی شده انحلالی در 1180°C
۱۰۲.....	۴-۲-۴- نمونه های عملیات حرارتی شده انحلالی در 1200°C
۱۰۳.....	۳-۴- بررسی متالورژیکی نمونه های جوشکاری شده.....
۱۰۴.....	۱-۳-۴- روش GTAW.....
۱۰۸.....	۲-۳-۴- روش لیزر پالسی.....
۱۱۶.....	۴-۴- مطالعه آماری ترکیب در جوش.....
۱۲۴.....	فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات.....
۱۲۴.....	۱-۵- نتیجه گیری.....
۱۲۵.....	۲-۵- پیشنهادات.....
۱۲۶.....	منابع و مراجع.....

فهرست جداول و نمودارها

جدول و نمودار	صفحه
جدول ۱-۲ - ترکیب شیمیایی آلیاژ Inconel713LC مورد استفاده در تحقیق Souza.....	۴۷
جدول ۱-۳ - شرایط ریختگی نمونه ها.....	۸۵
جدول ۲-۳ - پارامترهای تعیین شده جوشکاری TIG.....	۸۶
جدول ۳-۳ - پارامترهای جوشکاری لیزر با سرعت متغیر.....	۸۸
جدول ۴-۳ - پارامترهای جوشکاری لیزر با توان متغیر.....	۸۸
جدول ۵-۳ - پارامترهای جوشکاری لیزر بدون پیشگرم.....	۸۸
جدول ۶-۳ - پارامترهای جوشکاری با پیشگرم $500^{\circ}C - 450^{\circ}C$	۸۹
جدول ۱-۴ - ترکیب شیمیایی آلیاژ Inconel 713LC.....	۹۱
جدول ۲-۴ - آنالیز عنصری منطقه مشخص شده در شکل ۴-۸.....	۹۵
جدول ۳-۴ - آنالیز عنصری منطقه مشخص شده در شکل ۴-۹.....	۹۵
جدول ۴-۴ - آنالیز عنصری منطقه مشخص شده در شکل ۴-۱۰.....	۹۶
جدول ۵-۴ - آنالیز عنصری منطقه مشخص شده در شکل ۴-۱۱.....	۹۷
جدول ۶-۴ - آنالیز عنصری ناحیه مشخص شده در شکل ۴-۳۷.....	۱۰۷
جدول ۷-۴ - آنالیز عنصری ناحیه مشخص شده در شکل ۴-۳۸.....	۱۰۷
جدول ۸-۴ - آنالیز عنصری نواحی مشخص شده در شکل ۴-۳۹.....	۱۰۸
جدول ۹-۴ - آنالیز عنصری نواحی مشخص شده در شکل ۴-۴۲.....	۱۱۱
جدول ۱۰-۴ - آنالیز عنصری نواحی مشخص شده در شکل ۴-۴۴.....	۱۱۲
جدول ۱۱-۴ - آنالیز عنصری نواحی مشخص شده در شکل ۴-۴۷.....	۱۱۳
جدول ۱۲-۴ - آنالیز عنصری نواحی مشخص شده در شکل ۴-۴۸.....	۱۱۴
جدول ۱۳-۴ - آنالیز عنصری نواحی مشخص شده در شکل ۴-۵۱.....	۱۱۵
جدول ۱۴-۴ - آنالیز عنصری نواحی مشخص شده در شکل ۴-۵۲.....	۱۱۶
جدول ۱۵-۴ - پارامترهای تعیین شده جوشکاری TIG.....	۱۱۷
نمودار ۱-۴ - اثر افزایش حرارت ورودی بر ترکیب جوش TIG.....	۱۱۷
جدول ۱۶-۴ - پارامترهای جوشکاری لیزر با توان متغیر.....	۱۱۸
نمودار ۲-۴ - اثر افزایش توان متوسط بر ترکیب فلز جوش.....	۱۱۸
نمودار ۳-۴ - اثر افزایش توان متوسط بر تعداد حفرات در فلز جوش.....	۱۱۹
جدول ۱۷-۴ - پارامترهای جوشکاری لیزر با سرعت متغیر.....	۱۲۰
نمودار ۴-۴ - اثر افزایش سرعت جوشکاری بر ترکیب فلز جوش.....	۱۲۰
نمودار ۵-۴ - اثر افزایش سرعت جوشکاری بر تعداد حفرات در فلز جوش.....	۱۲۱
جدول ۱۸-۴ - پارامترهای جوشکاری لیزر نمونه های مورد استفاده در بررسی اثر پیشگرم $450-500^{\circ}C$ بر جوشپذیری.....	۱۲۱
نمودار ۶-۴ - اثر پیشگرم بر ترکیب فلز جوش در نمونه های عملیات حرارتی شده انحلالی.....	۱۲۲
نمودار ۷-۴ - اثر پیشگرم بر تعداد حفرات در فلز جوش در نمونه های عملیات حرارتی شده انحلالی.....	۱۲۲
جدول ۱۹-۴ - پارامترهای جوشکاری لیزر نمونه های مورد استفاده در بررسی اثر عملیات حرارتی انحلالی بر جوشپذیری.....	۱۲۳

فهرست جداول و نمودارها

جدول و نمودار

صفحه

نمودار ۴-۸- اثر عملیات حرارتی انحلال بر ترکیبگی فلز جوش..... ۱۲۳

فهرست تصاویر

صفحه	تصویر
۳	شکل ۱-۱- مقایسه جوش پذیری سوپرآلیاژهای مختلف
۱۱	شکل ۱-۲- یوتکتیک γ -MC در نزدیکی نواحی جوشکاری شده
۱۱	شکل ۲-۲- مورفولوژی کاربرد MC
۱۲	شکل ۳-۲- مراحل تبدیل MC به $M_{23}C_6$ (از راست به چپ)
۱۷	شکل ۴-۲- مورفولوژی فاز سیگما
۲۵	شکل ۵-۲- انحلال گاماپرایم در HAZ به همراه دیاگرام فازی، سیکل حرارتی، منحنی C شکل رسوب دهی، میکروساختار و افت سختی
۲۵	شکل ۶-۲- پروفیل سختی جوشهای GTA و لیزر IN718 در شرایط پس از جوشکاری S: در حالت اولیه ی انحلالی A: در حالت اولیه ی رسوب داده شده
۲۶	شکل ۷-۲- میکروساختار فلز پایه و نقاط مختلف HAZ آلیاژ Udimet700
۲۸	شکل ۸-۲- جوش غیر همجنس IN718 به فولاد زنگ نزن آستینیتی به روش جوشکاری باریکه الکترونی
۲۸	شکل ۹-۲- مقایسه نفوذ جوش باریکه الکترونی و TIG
۳۰	شکل ۱۰-۲- تعمیر قطعه بزرگ ریخته گری دقیق از جنس IN939
۳۰	شکل ۱۱-۲- مقطع جوش تعمیری شکل قبل دارای ترکیب HAZ
۳۱	شکل ۱۲-۲- پروفیل دمایی و میدان تنشی پره های Free Standing (بدون شroud)
۳۲	شکل ۱۳-۲- پروفیل دمایی و میدان تنشی پره های دارای شroud
۳۲	شکل ۱۴-۲- آسیب های معمول ایرفویل پره ها
۳۳	شکل ۱۵-۲- تنشهای همراه با جوشهای تعمیری پس از قرار گیری در توربین
۳۴	شکل ۱۶-۲- محدودیتهای جوش تعمیری پره ردیف اول GE MS7000
۳۴	شکل ۱۷-۲- محدودیتهای جوش تعمیری پره ردیف اول و دوم Westinghouse W501
۳۵	شکل ۱۸-۲- محدودیتهای جوش تعمیری پره شروودار ردیف سوم GE MS7000 (تعمیر در ایرفویل مجاز نمی باشد)
۳۷	شکل ۱۹-۲- تاثیر Al و Ti بر جوشپذیری سوپرآلیاژها
۳۸	شکل ۲۰-۲- دیاگرام جوش پذیری IN718
۳۹	شکل ۲۱-۲- نمودارهای داکتیلیته گرم برای Inconel 600
۴۱	شکل ۲۲-۲- (a) داکتیلیته اختیاری مینیمم (b) نرخ بازیابی داکتیلیته (c) بازه داکتیلیته صفر (d) داکتیلیته بازه دمای میانی مورد استفاده در معیار حساسیت به ترک
۴۲	شکل ۲۳-۲- ایزوترمهای اطراف حوضچه جوش متحرک
۴۴	شکل ۲۴-۲- (a) خطوط استحکام تسلیم و تنش صفر در ناحیه HAZ (b) خط استحکام تسلیم و سطح داکتیلیته صفر برای یک آلیاژ مقاوم به ترک (c) خط استحکام تسلیم و سطح داکتیلیته صفر برای یک آلیاژ حساس به ترک (d) خط استحکام تسلیم و یک بازه دمای میانی که به سمت داکتیلیته صفر میل می کند
۴۵	شکل ۲۵-۲- تشکیل یوتکتیک γ - γ' در مرحله آخر انجماد در ترکیب گرم
۴۵	شکل ۲۶-۲- گوشه غنی از نیکل سیستم سه تایی Ni-Ti-C (تاثیر میزان کربن بر مسیر انجماد)
۵۰	شکل ۲۷-۲- تصویر شماتیک ناحیه حساس به ترک گرم در منطقه خمیری حین انجماد ستونی-دندریتی تک کریستال

فهرست تصاویر

صفحه	تصویر
۵۱	شکل ۲-۲۸- برهمکنش پیچیده پارامترهای فرآیند موثر بر ترکیب‌های انجمادی جوش.....
۵۲	شکل ۲-۲۹- تصویر شماتیک مراحل انجمادی دندریتی (a و b) بازگشت مذاب (c) فیلم نازک مذاب.....
۵۳ (f و e) پیوستگی دندریتی.....
۵۳	شکل ۲-۳۰- میکروساختار انجمادی در بین دندریتهای آلیاژ ریختگی.....
۵۴	شکل ۲-۳۱- توزیع مذاب در مرز دانه و تاثیر آن بر ترکیب‌های انجمادی.....
۵۴	شکل ۲-۳۲- اثر توزیع پیوسته و ناپیوسته مذاب در مرزدانه بر ترکیب‌های انجمادی.....
۵۶	شکل ۲-۳۳- تاثیر شکل حوضچه بر شکل دانه های انجمادی.....
۵۷	شکل ۲-۳۴- تصویر شماتیک مقایسه ساختار دانه بین (a) انجماد آستنیتی و (b) انجماد فریتی.....
۵۸	شکل ۲-۳۵- مرزهای جاذب و دافع در انجماد ستونی.....
۶۰	شکل ۲-۳۶- اثر زاویه مرزدانه بر ترکیب‌های انجمادی.....
۶۰	شکل ۲-۳۷- ترکیب‌های انجمادی در جوش لیزر آلیاژ IC6.....
۶۲	شکل ۲-۳۸- تاثیر میدانهای تنش بر ترکیب‌های انجمادی.....
۶۳	شکل ۲-۳۹- منحنی داکتیلیتی و بازه دمایی تردی.....
۶۴	شکل ۲-۴۰- مورفولوژی زیگزاگی ترک ذوبی در HAZ آلیاژ IN738 (راست) و آلیاژ IN718 (چپ).....
۶۶	شکل ۲-۴۱- درصد وزنی گاما پرایم بر حسب دما در نرخهای گرمایش متفاوت.....
۶۶	شکل ۲-۴۲- درصد وزنی گاما پرایم باقی مانده در شروع ذوب بر حسب نرخ گرمایش برای اندازه اولیه ذرات متفاوت.....
۶۷	شکل ۲-۴۳- دمای تشکیل مذاب بر حسب نرخ گرمایش برای اندازه اولیه ذرات متفاوت.....
۶۹	شکل ۲-۴۴- ترک ذوبی جوش لیزر آلیاژ IN738 ناشی از ذوب ترکیبی کاربیدهای MC.....
۷۰	شکل ۲-۴۵- ترک ذوبی در آلیاژ IC6 (راست) و آلیاژ IN738 (چپ) ناشی از ذوب ترکیبی رسوبات γ' و یوتکتیک $\gamma'-\gamma$
۷۰	شکل ۲-۴۶- ترک ذوبی جوش لیزر آلیاژ IN738 ناشی از ذوب ترکیبی کاربیدهای یوتکتیک $\gamma'-\gamma$ که معمولاً با فازهای دیگری مانند پرایدها و سولفورپرایدها همراه است.....
۷۱	شکل ۲-۴۷- ترک ذوبی جوش لیزر آلیاژ IN738 ناشی از ذوب ترکیبی گامای بین دانه ای.....
۷۳	شکل ۲-۴۸- تغییرات مورفولوژیکی رسوبات گاما پرایم در جوش EB آلیاژ IN713C.....
۷۶	شکل ۲-۴۹- پدیده LFM در مرزدانه های HAZ IN738.....
۷۹	شکل ۲-۵۰- تشکیل محصولات انجماد یافت نهایی ثانویه غنی از Nb در مرزهای ترمیم شده به وسیله بازگشت مذاب که بوسیله محلول تک فاز γ انجماد مجدد یافته، احاطه شده است. آلیاژ IN 718.....
۸۰	شکل ۲-۵۱- گسترش ترک در میان اجزاء انجماد مجدد یافته در مرزهای ترمیم شده.....
۸۱	شکل ۲-۵۲- ترکیب‌های HAZ فقط در مرزهای تصادفی.....
۸۱	شکل ۲-۵۳- توقف ترک HAZ در مرز با زاویه کم.....
۸۴	شکل ۳-۱- میکروسکوپ الکترونی (راست) و دستگاه لایه نشانی طلا (چپ) مورد استفاده در تحقیق حاضر.....
۸۵	شکل ۳-۲- فرآیند تولید مدل و قالب ریختگی نمونه ها.....
۸۶	شکل ۳-۳- نمونه جوشکاری شده به روش GTAW تحت اتمسفر محافظ.....
۸۷	شکل ۳-۴- چیدمان آزمایشگاهی مورد استفاده در تحقیق.....
۸۷	شکل ۳-۵- فیکسچر.....

فهرست تصاویر

تصویر	صفحه
شکل ۳-۶- نمونه های طولی	۸۹
شکل ۴-۱- توزیع کاربیدها و حفرات انقباضی- کاربیدها بیشتر در مرزخانه ها تجمع دارند	۹۳
شکل ۴-۲- حضور کاربیدهای بین دندریتی	۹۳
شکل ۴-۳- حضور کاربیدهای بین دندریتی	۹۳
شکل ۴-۴- کاربیدهای تراشه ای (script) و حفره انقباضی	۹۴
شکل ۴-۵- حضور کاربیدهای مستقل در زمینه	۹۴
شکل ۴-۶- کاربیدهای منقطع در مرز	۹۴
شکل ۴-۷- مورفولوژی کاربیدهای مرزی	۹۴
شکل ۴-۸- مورفولوژی سر چکشی کاربید مرزی	۹۴
شکل ۴-۹- کاربیدهای تراشه ای و منقطع مرزی	۹۵
شکل ۴-۱۰- کاربیدهای ترشه ای (script)	۹۶
شکل ۴-۱۱- کاربیدهای مرزی	۹۶
شکل ۴-۱۲- دانه بندی و جهت گیری دندریتها به همراه توزیع کاربیدها- بزرگنمایی 50X	۹۷
شکل ۴-۱۳- دانه بندی و جهت گیری دندریتها - بزرگنمایی 100X	۹۷
شکل ۴-۱۴- کاربیدهای بین دندریتی و رسوبات گاما پرایم- بزرگنمایی 400X	۹۸
شکل ۴-۱۵- رسوبات گاما پرایم- بزرگنمایی 1000X	۹۸
شکل ۴-۱۶- رسوبات گاما پرایم و کاربید مستقل در زمینه	۹۸
شکل ۴-۱۷- کاربیدهای مرزی	۹۸
شکل ۴-۱۸- نمونه عملیات حرارتی شده در 1120°C - بزرگنمایی 400X	۹۹
شکل ۴-۱۹- نمونه عملیات حرارتی شده در 1120°C - بزرگنمایی 1000X	۱۰۰
شکل ۴-۲۰- نمونه عملیات حرارتی شده در 1120°C - بزرگنمایی 3000X	۱۰۰
شکل ۴-۲۱- نمونه عملیات حرارتی شده در 1150°C - بزرگنمایی 400X	۱۰۰
شکل ۴-۲۲- نمونه عملیات حرارتی شده در 1150°C - بزرگنمایی 1000X	۱۰۱
شکل ۴-۲۳- نمونه عملیات حرارتی شده در 1150°C - بزرگنمایی 3000X	۱۰۱
شکل ۴-۲۴- نمونه عملیات حرارتی شده در 1180°C - بزرگنمایی 400X	۱۰۱
شکل ۴-۲۵- نمونه عملیات حرارتی شده در 1180°C - بزرگنمایی 1000X	۱۰۲
شکل ۴-۲۶- نمونه عملیات حرارتی شده در 1180°C - بزرگنمایی 3000X	۱۰۲
شکل ۴-۲۷- نمونه عملیات حرارتی شده در 1200°C - بزرگنمایی 400X	۱۰۲
شکل ۴-۲۸- نمونه عملیات حرارتی شده در 1200°C - بزرگنمایی 1000X	۱۰۳
شکل ۴-۲۹- نمونه عملیات حرارتی شده در 1200°C - بزرگنمایی 3000X	۱۰۳
شکل ۴-۳۰- ساختار جوش و ترک HAZ در نمونه جوشکاری شده با 100X-40A	۱۰۵
شکل ۴-۳۱- نفوذ مذاب به مرزخانه های HAZ در نمونه جوشکاری شده با 1000X-40A	۱۰۵
شکل ۴-۳۲- ترکیب HAZ در نمونه جوشکاری شده با 200X-50A	۱۰۵
شکل ۴-۳۳- ساختار فلز جوش در نمونه جوشکاری شده با 400X-50A	۱۰۵

فهرست تصاویر

تصویر	صفحه
شکل ۴-۳۴- ترکیدگی فلز جوش در نمونه جوشکاری شده با 200X-60A	۱۰۶
شکل ۴-۳۵- ترکیدگی HAZ و فلز جوش در نمونه جوشکاری شده با 200X-60A	۱۰۶
شکل ۴-۳۶- ترکیدگی شدید جوش در نمونه جوشکاری شده با 50X-40A	۱۰۶
شکل ۴-۳۷- حضور کاربیدهای MC در محل ترک	۱۰۷
شکل ۴-۳۸- دوب ترکیبی کاربید در محل ترک	۱۰۷
شکل ۴-۳۹- ترکیدگی در فلز جوش (a) مرکز دندریت (ناحیه مشخص شده) (b) ناحیه بین دندریتی (ناحیه مشخص شده)	۱۰۸
شکل ۴-۴۰- مقطع عرضی جوش keyhole - بزرگنمایی 50X	۱۱۰
شکل ۴-۴۱- خط جوش - بزرگنمایی 200X	۱۱۰
شکل ۴-۴۲- مقطع طولی - بزرگنمایی 50X	۱۱۰
شکل ۴-۴۳- فازهای غنی از Nb تشکیل شده درون ترک فلز جوش (a) خط مرکزی جوش (b) نواحی کناری فلز جوش	۱۱۱
شکل ۴-۴۴- مقایسه نواحی بین دندریتی و مرکز دندریتها (a) ناحیه بین دندریتی (b) مرکز دندریت	۱۱۱
شکل ۴-۴۵- مقطع عرضی جوش keyhole - بزرگنمایی 50X	۱۱۲
شکل ۴-۴۶- مقطع طولی - بزرگنمایی 50X	۱۱۲
شکل ۴-۴۷- فازهای داخل ترک گرم	۱۱۳
شکل ۴-۴۸- مقایسه نواحی بین دندریتی و مرکز دندریتها (a) ناحیه بین دندریتی (b) مرکز دندریت	۱۱۳
شکل ۴-۴۹- مقطع عرضی جوش keyhole - بزرگنمایی 50X	۱۱۴
شکل ۴-۵۰- مقطع طولی - بزرگنمایی 50X	۱۱۴
شکل ۴-۵۱- فاز غنی از Nb و Zr درون ترک انجمادی	۱۱۵
شکل ۴-۵۲- مقایسه نواحی بین دندریتی و مرکز دندریتها (a) ناحیه بین دندریتی (b) مرکز دندریت	۱۱۵

فصل اول

مقدمه

فصل اول: مقدمه

سوپر آلیاژها گروهی از مواد هستند که تعیین مرزی دقیق برای آن‌ها بسیار مشکل است. به هر حال تعریفی که از سال‌ها پیش برای این گروه از مواد به کار رفته است به طور مستدلی قابل قبول است. "سوپر آلیاژ، آلیاژی است که برای کاربرد دمای بالا توسعه یافته است و معمولاً بر پایه‌ی عناصر واسطه می‌باشد. به طوری که خواص مکانیکی و پایداری سطحی بالایی از آن انتظار می‌رود." "سوپر آلیاژها به سه گروه کلی تقسیم می‌شوند که عبارتند از سوپر آلیاژهای پایه نیکل، سوپر آلیاژهای پایه کبالت و سوپر آلیاژهای پایه آهن؛ علاوه بر این، یک زیرگروه عمده نیز وجود دارد که خواص متالورژیکی بسیار مشابهی با آلیاژهای پایه نیکل دارد اما شامل مقدار نسبتاً زیادی آهن می‌باشد. لذا سوپر آلیاژهای پایه نیکل - آهن نامیده می‌شوند [1].

اما تعداد کمی از این آلیاژها که به عنوان سوپر آلیاژ شناخته می‌شوند، می‌توانند برای دوره‌های طولانی زمانی در دمای بالا قرار گیرند. در میان آن‌ها سوپر آلیاژهای پایه نیکل به طور گسترده‌ای برای اجزاء موتورهای جت و توربین‌های گازی - که به مواد ویژه با مقاومت به اکسیداسیون و کارایی مکانیکی بالا در گستره‌ی زیاد دمایی، نیاز دارند - به کار می‌رود. بسیاری از سوپر آلیاژهای پایه نیکل از محلول جامد فاز γ و فاز رسوبات γ' $Ni_3(Al, Ti)$ که با زمینه به صورت همدوس هستند و انواع متنوعی از کاربیدها و سایر فازها که در زمینه و در طول مرزخانه‌ها توزیع پیدا کرده‌اند، تشکیل شده‌اند [2].

به منظور پاسخ به تقاضای روزافزون برای افزایش دمای کاری این موتورها، طراحی روش‌ها و آلیاژهای پیشرفته به کارگرفته شد که به دو جنبه‌ی ریز ساختاری عمده در سوپر آلیاژهای پایه نیکلی منجر گردید: (۱) مرزخانه‌های کمتر (۲) پایداری بالاتر و کسر حجمی بیشتر فاز γ'

کاهش تعداد مرزدانه ها از طریق استفاده از آلیاژ انجماد جهت دار یافته و یا حذف همگی آن ها از طریق استفاده از تک کریستال ها و افزایش کسر حجمی و پایداری γ' از طریق افزودن عناصر آلیاژی سازنده ی γ' -Al,Ti- میسر می باشد [3].

جوش پذیری سوپر آلیاژهای مقاوم به حرارت پایه نیکل به خاطر کاربرد گسترده ی جوشکاری در ساخت و تعمیر اجزاء بخش داغ در توربین های گازی صنعتی و هوایی که از این ماده تولید می شوند ، اهمیت زیادی یافته است. پیشرفت های ساختاری در جوش های سوپر آلیاژی که به میزان زیادی کنترل کننده ی خواص و اعتبار جوشکاری شده است ، می تواند به شکل مهمی با ریز جدایش و استحاله ی فازی غیر تعادلی که در حین انجماد اتفاق می افتد تحت تأثیر قرار گیرد. [4] لذا بیشترین تلاش ها بر روی تحقیقات جوش پذیری و اجتناب از مشکلاتی نظیر ترکیدگی انجمادی در خط جوش ، ترکیدگی ذوبی در HAZ و یا ترک پیر کرنشی معطوف شده است [5].

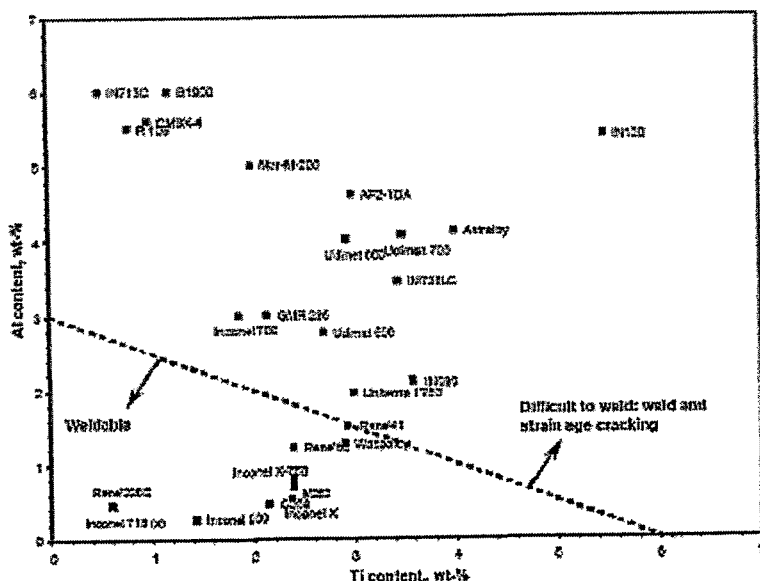
سوپر آلیاژهای استحکام یافته با رسوبات γ' استعداد بالایی به ترکیدگی در حین جوشکاری دارند [6]. عموماً جوشکاری آن دسته از سوپر آلیاژهای پایه نیکلی که دارای مقادیر بالای Al, Ti هستند (>6%wt) بسیار مشکل است. زیرا حساسیت بالایی به ترک در HAZ در حین جوش و عملیات حرارتی پس از جوش و عملیات حرارتی پس از جوش از طریق ترک پیر کرنشی دارند [7].

این پدیده قبل از همه به میزان Al, Ti - که به طور مستقیم با میزان فاز γ' در ارتباط است - مرتبط می باشد. جوش پذیری و خواص مکانیکی آلیاژهای رسوب سخت قویاً به کمیت و مورفولوژی فاز بین فلزی γ' بستگی دارد [6].

وجود این ترک ها در این سوپر آلیاژها مشکلی جدی است که عموماً کاربرد جوشکاری ذوبی را برای اتصال سوپر آلیاژهای پایه نیکل پیشرفته محدود می سازد [3]. همچنین ترکیدگی در حین جوش در این آلیاژها به طور عمده به تنش های انقباضی شدید ناشی از رسوب سریع رسوبات γ' و یا فازهای انجماد یافته ی نهایی در مرزدانه های HAZ نیز در بروز ترک دخیل هستند [4,8].

آلیاژ اینکونل LC ۷۱۳ یک سوپر آلیاژ ریختگی پایه نیکل کم کربن است که بدون انجام هرگونه عملیات حرارتی استفاده می شود. این آلیاژ علاوه بر مقاومت قابل توجه به خوردگی داغ ، استحکام و پایداری دمای بالا و داکتیلیته ی دمای متوسط عالی را از طریق رسوب سختی به وسیله فاز منظم γ' (L1₂) ارائه می کند. خواص ذکر شده ، این آلیاژ را به یکی از آلیاژهای پرکاربرد دمای بالا که عموماً در ساخت اجزاء موتور هواپیما مورد استفاده قرار می گیرد ، تبدیل کرده است [9] .

این آلیاژ به خاطر مقادیر بالای Al, Ti شدیداً به ترک HAZ, PWHT حساس است [8,4] . به خاطر میزان بالای فاز ناشی γ' از غلظت Ti, Al بیشتر از یک مقدار بحرانی ، این آلیاژ از جمله آلیاژهای جوش ناپذیر محسوب می شود. بر اساس مطالعات Mikolowski [10] این مقادیر بحرانی 3%Al, 6%Ti از لحاظ وزنی می باشد ؛ و بر اساس مطالعات Henderson [11] میزان کل Al, Ti نباید از ۴% تجاوز کند. با توجه به دیگرام های موجود ، میزان فاز بین فلزی در این آلیاژ از ۵۰% تجاوز می کند ؛ لذا به نظر می رسد یکی از سوپر آلیاژهایی است که مشکل ترین جوشکاری را دارند و حتی ممکن است کاملاً جوش ناپذیر باشد. این آلیاژ پلاستیسیته ی کمی را نشان می دهد (A = 6%) که تمایل به ترک در HAZ را افزایش می دهد [6] .



شکل ۱-۱- مقایسه جوش پذیری سوپر آلیاژهای مختلف [12]