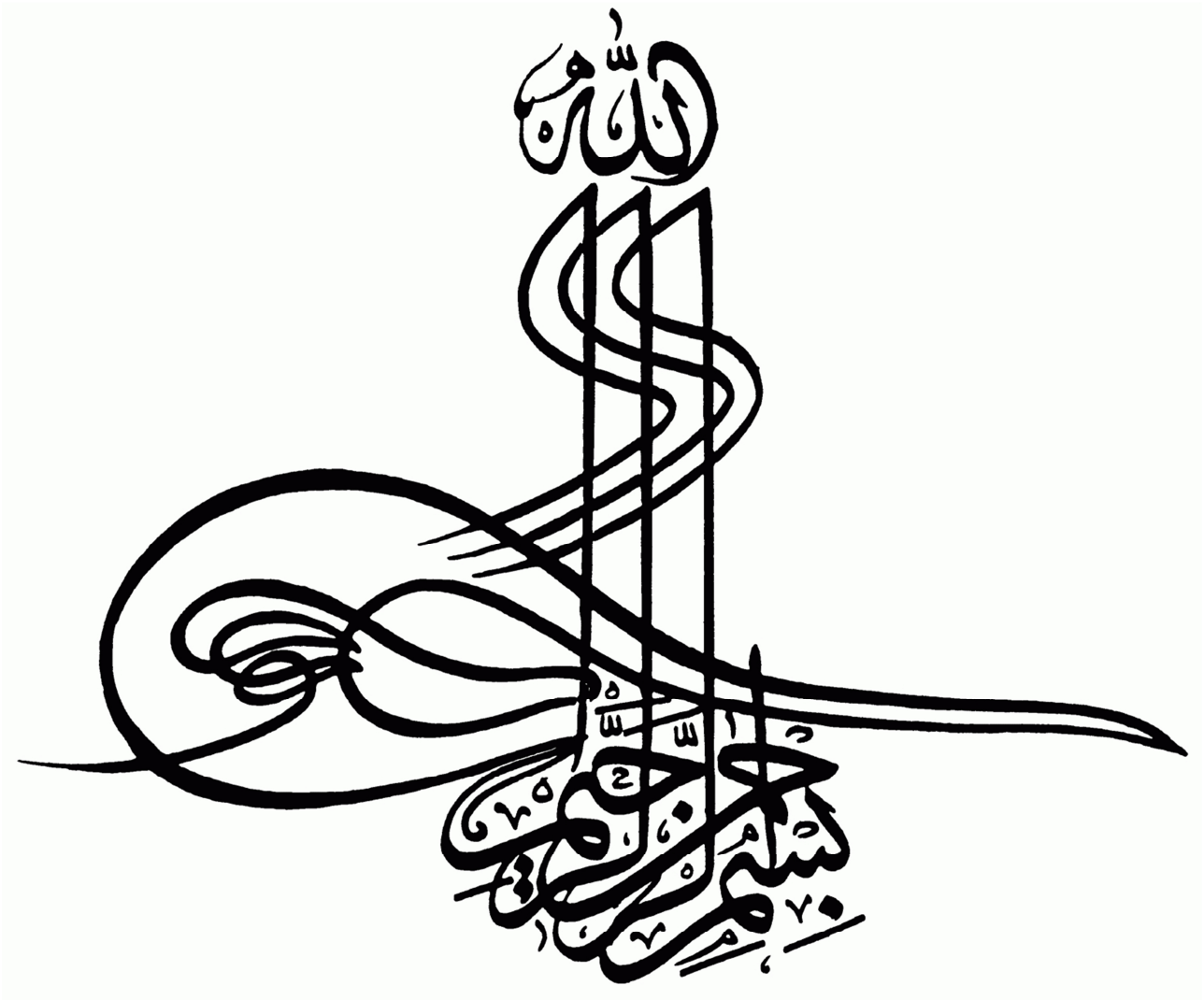
الله
بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی مواد

جوشکاری غیر مشابه سوپرآلیاژ اینکونل 617 به فولاد زنگ‌نزن آستنیتی 310 و ارزیابی خواص اتصال

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مواد

حسن شاه‌حسینی

اساتید راهنما
دکتر مرتضی شمعانیان
دکتر احمد کرمانپور

1389

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی مواد

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته شناسایی و انتخاب مواد آقای حسن شاه‌حسینی

تحت عنوان

جوشکاری غیر مشابه سوپرآلیاژ اینکونل 617 به فولاد زنگ‌نزن آستنیتی 310 و ارزیابی خواص اتصال

درتاریخ 1389/12/24 توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت:

1- استاد راهنمای پایان نامه	دکتر مرتضی شمعانیان
2- استاد راهنمای پایان نامه	دکتر احمد کرمانپور
3- استاد داور	دکتر احمد ساعتچی
4- استاد داور	دکتر عبدالرضا سلطانی‌پور
سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر مسعود پنجه‌پور

در ابتدا بر خود لازم می دانم از اساتید ارجمندم جناب آقایان **دکتر شمعانیان و دکتر کرمانپور** که انجام تحقیق بدون مساعدت ایشان امکان پذیر نبود و درس صبر و شکیبایی را به من آموختند تشکر نموده و برایشان سلامتی و موفقیت را از درگاه ایزدی مسألت نمایم. مراتب امتنان و تشکر خود را از جناب آقایان **دکتر ساعتچی و دکتر سلطانی پور** اساتید داور این پایان نامه اعلام می نمایم، بدون شک نظرات آنان در جهت پربارتر نمودن این پژوهش مؤثر بوده است. از جناب آقای **رحیمی** که زحمت جوشکاری تمامی نمونه ها در تحقیق بر دوش ایشان بود و کادر فعال اداری، آزمایشگاهی و کارگاهی دانشکده مهندسی مواد سپاسگزاری می نمایم. و با تشکر از دوست خوبم جناب آقای **مهندس علیشاهی** که در مرحله تدوین پایان نامه از کمک های بی دریغش بهره بردم.

انجام این پژوهش و رسیدن به این مرحله بدون تردید مرهون زحمات و پشتیبانی بی دریغ خانواده، به خصوص پدر و مادر عزیزم بوده است. خداوند منان را به پاس ارزانی داشتن این دو گوهر گرانبها شاکر بوده و برایشان طول عمر و سرافرازی را خواستارم. زندگی سرشار از موفقیت و شادی را برای دو خواهر عزیزم، یاوران من در تمامی مراحل زندگی آرزو می کنم.

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

تقدیم به

مادرم

تمامی هستی‌ام

و

پدرم

سرمایه حقیقی زندگی من

این تحقیق با همکاری
شرکت نفت و گاز پارس جنوبی انجام شده است.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب .....هشت

فهرست اشکال .....یازده

فهرست جداول .....پانزده

چکیده 1

فصل اول: **مقدمه**

فصل دوم: **مرور مطالعاتی**

2-1- سوپر آلیاژهای پایه نیکل 5

2-1-1- مقدمه 5

2-1-2- انواع سوپر آلیاژهای پایه نیکل 6

2-1-3- روش‌های افزایش استحکام در سوپرآلیاژهای پایه نیکل 9

2-1-4- فازهای موجود در سوپرآلیاژهای پایه نیکل 12

2-1-5- عملیات حرارتی سوپر آلیاژهای پایه نیکل 13

2-2- سوپر آلیاژ اینکونل 617 15

2-2-1- معرفی 15

2-2-2- ریزساختار اینکونل 617 16

2-2-3- خواص مکانیکی اینکونل 617 19

2-2-4- خواص فیزیکی اینکونل 617 21

2-2-5- مقاومت به اکسیداسیون اینکونل 617 22

2-2-6- جوشکاری اینکونل 617 23

2-3- فولادهای زنگ‌نزن 25

2-3-1- معرفی 25

2-3-2- آلیاژهای استاندارد و مواد مصرفی 26

2-3-3- رسوبات در فولادهای زنگ‌نزن 29

2-3-4- متالورژی جوشکاری 30

2-4- فولاد زنگ‌نزن آستنیتی 310 35
2-5- جوشکاری غیر مشابه 37
2-5-1- تعریف 37
2-5-2- اتصال اینکونل 617 به فولاد 310 38
2-5-3- جوش‌پذیری 41
2-5-4- آزمون وارسترینت (برای ارزیابی ترک داغ) 42
2-5-5- کارهای مشابه انجام شده در زمینه جوشکاری غیر مشابه 43
2-6- جمع‌بندی 46

فصل سوم: مواد و روش انجام آزمایش‌ها

3-1- مواد مصرفی 47
3-2- آماده‌سازی نمونه‌ها و طرح اتصال 48
3-3- جوشکاری 49
3-4- عملیات حرارتی پیرسازی 50
3-5- متالوگرافی نوری، الکترونی و ارزیابی ترکیب شیمیایی 50
3-6- ارزیابی خواص مکانیکی 51
3-7- آزمون جوش‌پذیری 52

فصل چهارم: نتایج و بحث

4-1- ریز ساختار فلزات پایه 54
4-1-1- فلز پایه اینکونل 617 54
4-1-2- فلز پایه فولاد زنگ نزن 310 59
4-2- ریز ساختار فلزات جوش 61
4-2-1- فلز جوش مربوط به پرکننده اینکونل82 61
4-2-2- فلز جوش مربوط به پرکننده اینکونل617 67
4-2-3- فلز جوش مربوط به پرکننده فولاد زنگ‌نزن 310 73
4-2-4- مقایسه ریز ساختار فلزات جوش 76
4-3- ریز ساختار فصل مشترک فلزات جوش و فلزات پایه 77

4-3-1- ریز ساختار فصل مشترک فلز جوش اینکونل 82 و فلزات پایه 77
4-3-2- ریز ساختار فصل مشترک فلز جوش اینکونل 617 و فلزات پایه 82
4-3-3- ریز ساختار فصل مشترک فلز جوش فولاد آستنیتی 310 و فلزات پایه..... 85
4-4- ارزیابی خواص مکانیکی اتصالات 90
4-4-1- آزمون سختی 90
4-4-2- آزمون ضربه 90
4-4-3- آزمون کشش..... 96
4-5- بررسی جوش‌پذیری توسط آزمون وارسترینت 99
فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات
5-1- نتیجه‌گیری 106
5-2- پیشنهادات 108
مراجع 109

فهرست اشکال

عنوان **صفحه**

شکل 2-1:الف) ساختار کریستالی فاز (γ' - Ni_3 (Al,Ti) ب) ساختار کریستالی γ''-Ni_3Nb 11

شکل 2-2:(a) تصویر SEM آلیاژ 617 نشان دهنده رسوبات $M_{23}C_6$ و TiN (b) آنالیز EDS از TiN، (c) رسوبات $M_{23}C_6$ غنی از Mo، (d) رسوبات $M_{23}C_6$ غنی از Cr 18

شکل 2-3: ریزساختاراینکونل 617 الف) قبل از عملیات حرارتی ب) پس از عملیات حرارتی 18

شکل 2-4: الف) خواص کشش دمای بالای اینکونل 617 در شرایط نورد داغ-آنیل شده، ب) استحکام خستگی آلیاژ 617. 19

شکل 2-5: استحکام خزشی آلیاژ اینکونل 617 آنیل شده 20

شکل 2-6: مقاومت به اکسیداسیون آلیاژهای مقاوم به حرارت در 1000 درجه سانتیگراد 22

شکل 2-7: خواص مکانیکی دمای بالا اینکونل 617 جوشکاری شده با فرآیند GTAW و پرکننده 617 24

شکل 2-8: عمر از هم گسیختگی نمونه‌های فلز پایه و جوشکاری شده با فرآیندهای مختلف جوشکاری در دو دمای مختلف 25

شکل 2-9: اثر فاز سیگما بر استحکام ضربه‌ای در دمای اتاق بر آلیاژهای Fe-Cr-Ni 30

شکل 2-10: استحاله‌های حالت جامد و تکامل تدریجی ریزساختار فلز جوش 31

شکل 2-11: حساسیت به ترک خوردن انجمادی جوش به عنوان تابعی از ترکیب شیمیایی بر پایه داده‌های آزمون وارسترینت 33

شکل 2-12: نمودار سوتالا برای پیش بینی ترک خوردن انجمادی جوش بر مبنای ترکیب فلز جوش 34

شکل 2-13: توسعه مواد در صنعت تولید نیرو 38

شکل 2-14: اثر الف) فشار جزیی اکسیژن ب) دما بر روی نفوذ فلزی در اینکونل 617، فولاد 310 و تعدادی از آلیاژهای متداول بر اثر اکسیداسیون پس از قرار گیری در 930 درجه سانتیگراد به مدت یک سال 39

شکل 2-15: آزمون وارسترینت 42

شکل 3-1: طرح اتصال مورد استفاده و مشخصات ابعادی قطعات 49

شکل 3-2. جزییات نمونه برای آزمون ضربه چارپی طبق استاندارد ANSI-AWS B4.0 52

شکل 3-3: نمایی از نمونه‌های آماده شده برای آزمون جوش پذیری وارسترینت 53

شکل 4-1: ریز ساختار اینکونل 617 اچ شده با محلول کالینگ 55

شکل 4-2: ریزساختار اینکونل 617 اچ شده با محلول ماربل 55

شکل 4-3: تصویر میکروسکپ الکترونی از آلیاژ 617 الف) بزرگنمایی 1000 برابر، ب) بزرگنمایی 2000 برابر 56
شکل 4-4 : نتایج آنالیز عنصری الف) رسوبات نیترید تیتانیوم، ب) کاربید کمپلکس غنی از کروم و مولیبدن 57
شکل 4-5: ریز ساختار اینکونل 617 پس از عملیات پیرسازی شامل کاربیدهای غنی از مولیبدن پراکنده در ساختار 58
شکل 4-6: تصویر نوری از ریزساختار فولاد زنگ‌نزن آستنیتی 310 59
شکل 4-7: ریز ساختار فولاد 310 پس از پیرسازی در 1000 درجه سانتیگراد به مدت 120 ساعت 60
شکل 4-8: ریز ساختار دانه‌بندی فلز جوش اینکونل 82. 61
شکل 4-9: ریز ساختار فلز جوش اینکونل 82 در نزدیکی خط جوش الف) بزرگنمایی 200 برابر ب) بزرگنمایی 500 برابر.. 62
شکل 4-10: ریز ساختار فلز جوش اینکونل 82 در مرکز حوضچه جوش 63
شکل 4-11: تصویر میکروسکوپ الکترونی از ساختار فلز جوش اینکونل 82 الف) بزرگنمایی 500 برابر ب) بزرگنمایی 1000 برابر ج) یک رسوب ریز موجود در ریزساختار د) ساختار یوتکتیک لاوه 64
شکل 4-12: آنالیز ترکیب شیمیایی رسوبات روشن پراکنده در فلز جوش اینکونل 82. 65
شکل 4-13:ریز ساختار فلز جوش اینکونل 82 پس از عملیات پیرسازی 66
شکل 4-14: ریز ساختار فلز جوش اینکونل 617 67
شکل 4-15:ریز ساختار فلز جوش اینکونل 617 الف) مرکز فلز جوش ب) نزدیکی خط ذوب ج) فصل مشترک بین پاس دوم و سوم د) فصل مشترک بین پاس دوم و سوم در بزرگنمایی بالاتر 68
شکل 4-16: تصاویر میکروسکوپ الکترونی از فلز جوش اینکونل 617 در بزرگنمایی‌های مختلف 70
شکل 4-17: آنالیز رسوبات روشن پراکنده در ساختار فلز جوش اینکونل 617 71
شکل 4-18: آنالیز رسوبات تیره رنگ پراکنده در زمینه فلز جوش اینکونل 617 71
شکل 4-19: ریز ساختار جوش اینکونل 617 پس از پیرسازی 72
شکل 4-20: تصاویر میکروسکوپ الکترونی از فلز جوش اینکونل 617 الف) افزایش میزان رسوبات در ساختار ب) به هم پیوستن رسوبات در ساختار 72
شکل 4-21: ساختار تمام آستنیتی فلز جوش فولاد آستنیتی 310 73
شکل 4-22: تشکیل فریت در مرکز فلز جوش فولاد آستنیتی 310 74
شکل 4-23: الف) رسوبات پیوسته در مرزدانه‌ها و رسوبات پراکنده در ریز ساختار فلز جوش فولاد آستنیتی 310 75
شکل 4-24: آنالیز مرز دانه‌های آستنیت فلز جوش فولاد آستنیتی 310 75
شکل 4-25: ریز ساختار فلز جوش آستنیتی 310 پس از عملیات پیرسازی 76

شکل 4-26: مقایسه فواصل بین بازوهای اولیه دندریتی در فلزات جوش مختلف 77
شکل 4-27:فصل مشترک فلز جوش اینکونل 82 و فلز پایه اینکونل 617..... 78
شکل 4-28: رسوب کاربید در مرز دانه‌ها در فلز پایه 617 و ضخیم شدن آن‌ها 79
شکل 4-29: فصل مشترک فلز جوش اینکونل 82 و فلز پایه اینکونل 617 پس از عملیات پیرسازی 80
شکل 4-30: فصل مشترک فلز جوش اینکونل 82 و فلز پایه فولاد زنگ‌نزن 310..... 80
شکل 4-31: ترک در منطقه مخلوط نشده بین فلز جوش اینکونل 82 و فلز پایه فولاد زنگ‌نزن آستنیتی 310 81
شکل 4-32: ریز ساختار فصل مشترک فلز جوش اینکونل 82 و فولاد 310 پس از پیرسازی 82
شکل 4-33: فصل مشترک فلز جوش اینکونل 617 با فلز پایه اینکونل 617 83
شکل 4-34: فصل مشترک فلز جوش اینکونل 617 با فلز پایه اینکونل 617 در بزرگنمایی بالاتر 83
شکل 4-35: ریز ساختار فصل مشترک فلز جوش اینکونل 617 با فلز پایه اینکونل 617 پس از عملیات پیرسازی 84
شکل 4-36: منطقه مخلوط نشده در فصل مشترک فلز جوش اینکونل 617- فولاد 310..... 84
شکل 4-37: منطقه مخلوط نشده در فصل مشترک فلز جوش اینکونل 617- فولاد 310 در بزرگنمایی بالاتر 85
شکل 4-38: فصل مشترک فلز جوش اینکونل 617 و فولاد 310 پس از عملیات پیرسازی 86
شکل 4-39: ریز ساختار فصل مشترک فلز جوش فولاد 310 و فلز پایه اینکونل 617 86
شکل 4-40: فصل مشترک فلز جوش فولاد 310 و فلز پایه فولاد 310..... 87
شکل 4-41: فصل مشترک فلز جوش فولاد 310 و فلز پایه فولاد 310 در بزرگنمایی بالاتر 87
شکل 4-42: ترک انجمادی در منطقه مخلوط نشده فصل مشترک فلز جوش و فلز پایه 310 به موازات خط ذوب 88
شکل 4-43: ریز ساختار فصل مشترک فلز جوش فولاد 310 و فلز پایه فولاد 310 پس از پیرسازی 89
شکل 4-44: پروفیل ریزسختی برای اتصالات با فلز جوش الف) اینکونل 82 ب) اینکونل 617 ج) فولاد زنگ‌نزن 310..... 91
شکل 4-45: انرژی شکست فلزات پایه و قطعات جوشکاری شده قبل و بعد از پیرسازی 92
شکل 4-46: شکست نگاری فلز جوش اینکونل 82 الف) پس از جوشکاری ب) پس از عملیات پیرسازی..... 93
شکل 4-47: شکست نگاری فلز جوش اینکونل 617 الف) پس از جوشکاری ب) پس از عملیات پیرسازی 94
شکل 4-48: شکست نگاری فلز جوش فولاد 310 الف) پس از جوشکاری ب) پس از عملیات پیرسازی 95
شکل 4-49: نمودارهای تنش بر حسب کرنش مربوط به اتصالات پس از جوشکاری 96
شکل 4-50: نمودارهای تنش بر حسب کرنش مربوط به اتصالات پس از پیرسازی 96
شکل 4-51: نتایج آزمون جوش‌پذیری وارسترینت برای فلزات جوش الف) حداکثر طول ترک بر حسب کرنش 100

شکل 4-52: نحوه انتشار ترک‌ها در آزمون جوش پذیری، فلز جوش اینکونل 82 در کرنش 3% 101
شکل 4-53: ترک بوجود آمده در فلز جوش اینکونل 82 در کرنش 3% در بزرگنمایی‌های مختلف. 102
شکل 4-54: آنالیز نوک ترک به وجود آمده در فلز جوش اینکونل 82 پس از آزمون جوش‌پذیری در کرنش 3% 103
شکل 4-55: ترک بوجود آمده در فلز جوش فولاد 310 در کرنش 3%..... 104
شکل 4-56: تغییرات ضریب انبساط حرارتی فلزات پایه و جوش در اتصال غیر مشابه فولاد 310 به اینکونل 617 105

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول 2-1: ترکیب شیمیایی سوپر آلیاژهای کارشده 7

جدول 2-2: فازهای متداول در سوپر آلیاژهای پایه نیکل 14

جدول 2-3: سیکل‌های تنش زدایی و آنیل تعدادی از سوپرآلیاژها 15

جدول 2-4: مشخصات آلیاژ اینکونل 617 در استانداردهای مختلف و ترکیب شیمیایی آن 16

جدول 2-5: فراوانی فازهای مختلف در اینکونل تحت تنش پیرسازی شده در دمای 649 تا 1093 سانتیگراد 17

جدول 2-6: خواص مکانیکی اینکونل 617 در دمای اتاق 19

جدول 2-7: خواص کششی اینکونل 617 پیرشده 20

جدول 2-8: انرژی شکست در دمای اتاق اینکونل 617 پیرشده در $1000C^{\circ}$ 21

جدول 2-9: خواص فیزیکی اینکونل 617 21

جدول 2-10: شرایط جوشکاری SMAW آلیاژ اینکونل 617 23

جدول 2-11: شرایط جوشکاری قوس- الکترود تنگستنی با گازمحافظ آلیاژ اینکونل 617 24

جدول 2-12: ترکیب فولادهای زنگ نزن استاندارد کار شده 27

جدول 2-13: طبقه بندی فلزات پر کننده AWS برای فولادهای زنگ نزن آستنیتی 28

جدول 2-14: رسوبات در فولادهای زنگ نزن آستنیتی..... 29

جدول 2-15: انواع انجماد، واکنش‌ها و ریزساختارهای حاصل شده 31

جدول 2-16: حداقل خواص مکانیکی فلزات جوش فولاد زنگ‌نزن آستنیتی 32

جدول 2-17: مشخصات فولاد 310 در استانداردهای مختلف و ترکیب شیمیایی آن 35

جدول 2-18: خواص فیزیکی در شرای آنیل انحلالی 36

جدول 2-19: خواص مکانیکی فولاد 310 36

جدول 2-20: مقاومت اکسیداسیون دینامیکی اینکونل 617، فولاد 310 و تعدادی از آلیاژهای پایه آهن، نیکل و کبالت در جریان گاز احتراقی با سرعت زیاد در 980 درجه سانتیگراد به مدت 1000 ساعت 40

جدول 2-21: حد تقریبی رقت عناصر (درصد وزنی) در جوش‌های غیرمشابه ایجاد شده توسط فلزات پرکننده پایه نیکلی .. 40

جدول 3-1: ترکیب شیمیایی فلزات پایه و پرکننده مورد استفاده. 48

جدول 3-2: مشخصات جوشکاری نمونه‌ها..... 50

جدول 3-3: ابعاد نمونه‌های آزمون کشش (mm) طبق استاندارد ANSI-AWS B4.0 51
جدول 3-4: پارامترهای جوشکاری مورد استفاده در آزمون وارسترینت. 53
جدول 4-1: مقدار کروم و نیکل معادل و نسبت آن‌ها در فلز جوش فولاد آستنیتی 310. 73
جدول 4-2: میانگین سختی اندازه‌گیری شده در قسمت‌های مختلف اتصالات. 92
جدول 4-3: نتایج حاصل از آزمون کشش. 97
جدول 4-4: خواص مکانیکی فلزات پایه و تمام جوش. 98

چکیده

در این پژوهش، جوشکاری غیر مشابه سوپرآلیاژ پایه نیکل اینکونل 617 به فولاد زنگ‌نزن آستنیتی310 به روش قوسی تنگستن- گاز مورد بررسی قرار گرفت. از سه فلز پرکننده اینکونل82 (ERNiCr3)، اینکونل617 (ERNiCrCoMo1) و فولاد زنگ نزن 310 (ER310) برای این منظور استفاده شد. با هدف تطابق شرایط آزمایشگاهی با شرایط واقعی جوشکاری در صنعت، اتصالات در حین جوشکاری با قیدگذاری بالا همراه شدند. پس از جوشکاری ریزساختار مناطق مختلف هر اتصال شامل فلزات جوش، مناطق متأثر از حرارت، فصل مشترک‌ها و مناطق مخلوط نشده با استفاده از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مجهز به سیستم آنالیز شیمیایی (EDS) مورد ارزیابی قرار گرفت. جوش‌پذیری اتصالات نیز توسط آزمون جوش‌پذیری بررسی شد. همچنین خواص مکانیکی شامل استحکام کششی، مقاومت در برابر ضربه و سختی و نیز شکست نگاری نمونه‌ها بررسی شد. از آنجا که اتصال فوق عموماً در دمای بالا کاربرد دارد، با هدف بررسی تأثیر شرایط دمایی در حین سرویس‌دهی، مشخصه‌یابی مکانیکی و ریزساختاری پس از عملیات پیرسازی اتصال در دمای 1000 درجه سانتیگراد به مدت 120 ساعت صورت پذیرفت. بررسی‌ها نشان دهنده وجود ساختار دندریتی در فلزات جوش پایه نیکلی بوده و هیچ‌گونه ترک انجمادی در ساختار آن‌ها مشاهده نشد. ریزساختار فلز جوش فولاد 310 بصورت سلولی-دندریتی بوده و به دلیل وجود فازهای با نقطه ذوب پایین و تنش‌های حرارتی، ترک‌های انجمادی در منطقه جوش و منطقه مخلوط نشده بین فلز پایه 310- فلز پرکننده 310 ، به موازات خط ذوب و نیز ترک‌هایی عمود بر آن در منطقه HAZ به وجود آمد. فلز جوش اینکونل 82 شامل رسوبات کاربید نیوبیوم و فاز یوتکتیک لاوه بوده و جدایش نیوبیوم به مناطق بین دندریتی و مهاجرت مرزهای دانه در آن اتفاق افتاد. فلز جوش اینکونل 617 دارای ساختار ظریف بوده و جدایش مولیبدن به مناطق بین‌دندریتی در آن رخ داد. عملیات پیرسازی موجب افزایش رسوبات در فلز جوش اینکونل 617 و فولاد 310 شد که عمدتاً بصورت کاربیدهای کروم و مولیبدن بود. در آزمون کشش تمامی نمونه‌ها قبل و بعد از پیرسازی، از محل فلز پایه فولاد 310 و به صورت نرم دچار شکست شدند. نمونه جوشکاری شده با فلز پرکننده اینکونل 617 بیشترین انعطاف‌پذیری و استحکام را در حالت قبل از پیرسازی از خود نشان داد. بیشترین و کمترین مقادیر سختی به ترتیب مربوط به فلز جوش اینکونل 617 و فولاد 310 بود. عملیات پیرسازی موجب افزایش سختی در فلزات جوش و فلز پایه 617 شد در حالی‌که سختی فلز پایه 310 کاهش نشان داد. بیشترین مقدار انرژی شکست با 205(J) مربوط به فلز جوش اینکونل 617 بود و در نتیجه عملیات پیرسازی، انرژی شکست تمامی نمونه‌ها کاهش یافت. نتایج آزمون جوش‌پذیری نیز نشان داد که فلزات جوش فولاد زنگ‌نزن 310 و اینکونل 617 در کرنش1% کمترین حساسیت به ترک داغ را دارند. در کرنش‌های بالاتر، حساسیت فلز جوش 310 به ترک داغ به میزان قابل توجهی افزایش یافت. در این آزمون فلز جوش 617 کمترین حساسیت به ترک داغ را در کرنش‌های بالاتر از 1% از خود نشان داد. پس از بررسی تمامی نتایج بدست آمده اینکونل 617 مناسب‌ترین انتخاب برای اتصال غیر مشابه فولاد زنگ‌نزن 310 به سوپرآلیاژ اینکونل 617 تشخیص داده شد.

کلمات کلیدی: اینکونل 617، فولاد زنگ‌نزن آستنیتی 310، جوشکاری غیرمشابه، آزمون وارسترینت

فصل اول

مقدمه

سوپرآلیاژها مواد مهندسی هستند که به دلیل دارا بودن خواص منحصر به فرد مانند استحکام، مقاومت به خزش و خوردگی داغ، به طور گسترده در دماهای بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند. سوپرآلیاژها از لحاظ ترکیب شیمیایی به سه گروه عمده تقسیم می‌شوند که شامل سوپرآلیاژهای پایه آهن-نیکل[1]، پایه نیکل[2] و پایه کبالت[3] می‌باشد. سوپرآلیاژهای پایه نیکل به عنوان پر مصرف‌ترین گروه در صنایع مختلفی مانند صنایع نفت و گاز، پالایشگاه، پتروشیمی، هوافضا، هسته‌ای، نیروگاه‌های تولید برق و تجهیزات پزشکی به کار گرفته می‌شوند. بررسی‌ها نشان دهنده گسترش روز افزون مصرف سوپرآلیاژها در شش دهه گذشته بوده و هم اکنون نیز تحقیقات وسیعی در زمینه گسترش و به کار گیری سوپرآلیاژها در حال انجام است [1،2]. اینکونل 617 یک سوپرآلیاژ پایه نیکل بوده و وجود مقادیر قابل توجهی از عناصری چون کروم، کبالت و مولیبدن در ترکیب آن، خواص ممتاز و بی‌نظیری را به آن بخشیده است. مقاومت به خوردگی داغ و اکسیداسیون بالا در حدود 1000 درجه سانتیگراد، به همراه استحکام خزشی و کششی عالی در دمای بالا باعث کاربرد وسیع اینکونل 617 در نیروگاه‌های گازی، بخار و سیکل ترکیبی، صنایع نفت، پتروشیمی و صنایع هسته‌ای شده است. دپارتمان انرژی ایالات متحده آمریکا این آلیاژ را به عنوان یکی از مواد کاندیدا در ساخت نسل جدید نیروگاه‌های هسته‌ای اعلام کرده است [3،4].

---

[1]- Iron-Nickel Base Superalloy
[2]- Nickel Base Superalloy
[3]- Cobalt Base Superalloy

فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی به عنوان بزرگ ترین و پرمصرف ترین گروه فولادهای زنگ نزن محسوب می شوند. این سری از فولادها با انجام کار سرد استحکام قابل توجهی بدست آورده و در کاربردهایی که نیازمند مقاومت به خوردگی خوب در اتمسفر و یا دمای بالا باشد به کار گرفته می شوند. بسته به ترکیب شیمیایی، دمای کاری این فولادها حتی می‌تواند به بالاتر از 760 درجه‌ی سانتیگراد نیز برسد اما استحکام و مقاومت به اکسیداسیون بسیاری از این فولادها در این دماها محدود می‌شود [5]. در بین فولادهای زنگ نزن فولاد زنگ نزن آستنیتی گرید310 به دلیل داشتن مقادیر بالایی از عناصر آلیاژی همچون نیکل و کروم در ترکیب شیمیایی و وجود ساختار آستنیتی یکی از رایج‌ترین و متداولترین آلیاژهای مورد استفاده در دماهای بالا و محیط های اکسید کننده به شمار می آید. به همین دلیل این گرید در کاربردهای دمایی بسیار بالا (بیش از 1000 درجه سانتیگراد) مانند اجزای کوره‌ها در صنایع عملیات حرارتی، سبدهای عملیات حرارتی، صنایع فرآوری نفت و همچنین آتش‌زن‌های مربوط به اتاق ریفرمر در صنایع تولید فولاد مورد استفاده قرار می‌گیرد [5،6]. این فولاد می‌تواند در شرایط دمایی ثابت تا 1150 درجه سانتیگراد و تحت شرایط دمایی متناوب تا 1035 درجه سانتیگراد را تحمل نماید [6].

در بسیاری از مواردی که یک انتقال جهت سازش با محیط خورنده تر یا استحکام عالی در دماهای بالا لازم است، فولادهای زنگ نزن به آلیاژهای پایه نیکلی جوش داده می شوند. از نظر اقتصادی جایگزینی آلیاژهای پایه نیکلی با فولادهای زنگ نزن هر جایی که امکان پذیر باشد غالباً عامل کنترل کننده است (آلیاژهای پایه نیکلی ممکن است که 3 تا 10 برابر گران تر باشد) [5]. به منظور جایگزینی سوپرآلیاژ اینکونل 617 با فولاد زنگ نزن آستنیتی 310 با هدف کاهش هزینه ها و یا انجام عملیات معکوس با هدف افزایش کارایی در مقاطع بحرانی تر، ایجاد اتصال فلزی غیر مشابه بین این دو آلیاژ با استفاده از فرآیندهای جوشکاری ذوبی امری اجتناب ناپذیر است. هنگامی‌که فلزات غیر مشابه با یک فرآیند جوشکاری ذوبی به هم متصل می شوند، آلیاژسازی بین فلزات پایه و فلز پرکننده (در صورت استفاده) به عنوان یکی از اصلی ترین مباحث مطرح می شود. دلیل این امر را می توان به تفاوت رفتاری فلز جوش بدست آمده با هر یک از فلزات پایه در طول سرویس نسبت داد. ترکیب شیمیایی فلز جوش بدست آمده می تواند با ترکیب شیمیایی فلزات پایه و پرکننده متفاوت بوده و با تغییر طرح اتصال، فرآیند جوشکاری، فلز پرکننده و دستورالعمل جوشکاری تغییر کند. بنابراین در اتصالات غیرمشابه انتخاب فلز پرکننده‌ای که بتواند اتصال مناسبی را بین دو آلیاژ برقرار کند از اهمیت بالایی برخوردار است [7].

در جوشکاری فلزات غیر مشابه، فلز پرکننده باید به آسانی با فلزات پایه آلیاژ شود تا فلز جوشی به وجود بیاید که یک فاز شبکه‌ای ممتد و انعطاف‌پذیر داشته و ریزساختار بدون حساسیت به ترک به وجود آورد. از طرف دیگر ریزساختار فلز جوش باید تحت شرایط کاری مورد نظر پایدار بوده و استحکام آن باید مساوی یا بیشتر از فلزات پایه

باشد. بیشتر اتصالات فولاد زنگ نزن به آلیاژهای پایه نیکل با فلزات پر کننده پایه نیکلی به دلیل انعطاف پذیری خوب و تحمل درجه رقت آهن انجام می شود. در بیشتر موارد، تکنیک های رسوب خط جوش کوچک، تا حدی محدب بودن پاس های جوش و پر کردن چاله های جوش، جهت جلوگیری از ترک خوردن انجمادی می تواند مفید باشد [7].

بررسی و مطالعه مراجع موجود نشان می دهد که با وجود اهمیت و کاربرد گسترده دو آلیاژ اینکونل 617 و فولاد زنگ نزن آستنیتی310 اطلاعاتی در مورد اتصال غیرمشابه آن ها وجود ندارد. لذا لازم است ریزساختار فلزات جوش، مناطق متاثر از حرارت، فصل مشترک‌ها و مناطق مخلوط نشده در مورد این اتصال مورد ارزیابی قرار گیرد. به علاوه خواص اتصال از قبیل جوش‌پذیری، استحکام کششی، چقرمگی شکست، شکست نگاری و سختی سنجی نیز بایستی بررسی شود. از طرفی به منظور بررسی تأثیر شرایط دمایی حاکم در حین سرویس‌دهی بایستی موارد فوق پس از قرارگیری اتصال در دمای 1000 درجه سانتیگراد نیز مورد ارزیابی قرار گیرد. بنابراین اهداف تحقیق حاضر در محورهای زیر خلاصه می‌شود:

الف- ارزیابی خواص اتصال در شرایط جوشکاری شده

1- ریزساختار فلزات پایه
2- ریزساختار فلزات جوش، فصل مشترک‌ها و منطقه متاثر از حرارت
3- خواص مکانیکی اتصال شامل خواص کشش، سختی سنجی و چقرمگی شکست
4- جوش‌پذیری اتصال

ب- ارزیابی خواص اتصال پس از پیرسازی در دمای 1000 درجه سانتیگراد

1- تحولات ریزساختاری فلزات پایه
2- تحولات ریزساختاری فلزات جوش و فصل مشترک‌ها
3- بررسی پایداری حرارتی فلزات جوش توسط آزمون‌های مکانیکی

محورهای فوق در راستای تعیین مناسب‌ترین فلز پرکننده جهت اتصال غیر مشابه اینکونل 617 به فولاد زنگ‌نزن آستنیتی 310 صورت پذیرفته است.