

صلى الله عليه وسلم



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مواد

بررسی اتصال غیرمشابه فولاد زنگ نزن آستنییتی ۳۱۶ AISI به فولاد کم کربن St ۳۷ با استفاده از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

پایان نامه کارشناسی ارشد جوشکاری

حسین خسروانی نژاد

اساتید راهنما

دکتر مرتضی شمعیان

دکتر احمد رضائیان



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مواد

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته جوشکاری آقای حسین خسروانی نژاد
تحت عنوان

**بررسی اتصال غیرمشابه فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۱۶ AISI به فولاد کم کربن ۳۷ St
با استفاده از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی**

در تاریخ ۹۲/۱۰/۲۸ توسط کمیته‌ی تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای اول پایان نامه دکتر مرتضی شمعیان

۲- استاد راهنمای دوم پایان نامه دکتر احمد رضائیان

۳- استاد مشاور پایان نامه دکتر مسعود عطاپور

۴- استاد داور دکتر فخرالدین اشرفی زاده

۵- استاد داور دکتر علی اشرفی

۶- سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده دکتر کیوان رئیسی

اکنون که به فضل الهی مراحل انجام این پایان نامه به اتمام رسیده است بر خود لازم می دانم که خداوند متان را شاکر باشم که به من توفیق علم آموزی عطا نمود.

از خانواده عزیزم که در تمام مراحل زندگی همواره همراه و پشتیبان من بودند کمال تشکر و قدردانی را دارم.

از اساتید بزرگوار جناب آقای دکتر شمعانیان و جناب آقای دکتر رضانیان که در نهایت سکیمایی ودقت فراوان راهنمایی این پایان نامه را بر عهده داشتند و انجام این تحقیق بدون دلسوزی ها و راهنمایی های ارزنده ایشان میسر نبود سپاسگذارم.

از استاد عزیزم جناب آقای دکتر عطاپور که مشاوره های ارزنده ایشان باعث بهبود کیفیت پایان نامه گردید تشکر می کنم.

از اساتید بزرگوار جناب آقای دکتر اشرفی زاده و جناب آقای دکتر اشرفی که با وجود مشغله زیاد زحمات فراوانی و داوری این پایان نامه را بر عهده گرفتند سپاسگذارم.

از کادر آزمایشگاهی و کارگاهی دانشکده مهندسی مواد و همچنین از جناب آقای مهندس کارگر مسئول محترم آزمایشگاه خواص مکانیکی مواد دانشگاه تربیت مدرس تهران که با نهایت حوصله ودقت من را در انجام آزمایش هایاری نمودند تشکر می کنم.

از تمامی دوستان عزیزم نیز که در مدت انجام این پایان نامه محظرات خوشی را در کنارشان سپری نمودم تشکر می کنم.

حسین خسروانی نژاد

زمستان ۱۳۹۲

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

با عشقی به وسعت تمام دگنئی ایم این پایان نامه را به پدر و مادرم تقدیم می کنم

پدرم، یگانه وجودی که عالمانه به من آموخت چگونه در عرصه ی زندگی، ایستادگی را تجربه نمایم.

مادرم، "خورشیدی" که آفتاب مهربانش در آستانه قلمم، به چنان پیر جاست و مرکز غروب نخواهد کرد.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فهرست مطالب	هشت
فهرست شکل ها	۵
فهرست جداول	سیزده
چکیده	۱
فصل اول: مقدمه	۲
فصل دوم: مروری بر مطالب	۵
۱-۲ معرفی فولادهای زنگ نزن	۵
۱-۱-۲ انواع فولادهای زنگ نزن	۶
۲-۱-۲ مقاومت به خوردگی فولادهای زنگ نزن	۷
۳-۱-۲ فولادهای زنگ نزن آستیتی	۹
۲-۲ فولادهای کم کربن	۱۳
۳-۲ فرایندهای جوشکاری حالت جامد	۱۵
۱-۳-۲ جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی	۱۵
۲-۳-۲ اصطلاحات متداول در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی	۱۸
۳-۳-۲ تجهیزات جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی	۱۹
۴-۳-۲ مزایای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی	۲۱
۵-۳-۲ متغیرهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی	۲۲
۶-۳-۲ تغییرات ریزساختاری	۲۸
۷-۳-۲ بازیابی و تبلور مجدد	۲۹
۸-۳-۲ جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی فولادها	۳۰
۴-۲ جمع بندی و هدف	۳۳
فصل سوم: مواد و روش تحقیق	۳۵
۱-۳ مواد اولیه	۳۵
۱-۱-۳ فلزات پایه	۳۵
۲-۱-۳ ابزار جوشکاری	۳۶
۲-۳ آماده سازی و جوشکاری نمونه ها	۳۶
۱-۲-۳ طراحی اتصال	۳۶
۲-۲-۳ تمیزکاری	۳۷
۳-۲-۳ جوشکاری	۳۷
۴-۲-۳ اندازه گیری دما	۳۸
۳-۳ بررسی های ریزساختاری	۳۹

۳۹	۱-۳-۳ تصویرگیری با میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی
۳۹	۲-۳-۳ آزمون پراش پرتو ایکس (XRD)
۴۰	۳-۳-۳ آزمون پراش الکترونی از الکترون‌های برگشتی (EBSD)
۴۰	۴-۳ آزمون‌های خواص مکانیکی
۴۰	۱-۴-۳ آزمون کشش
۴۰	۲-۴-۳ آزمون ریزسختی سنجی
۴۱	۳-۴-۳ آزمون سوراخ برشی
۴۲	۵-۳ آزمون‌های خوردگی
۴۲	۱-۵-۳ آزمون تافل
۴۳	۲-۵-۳ آزمون غوطه وری
۴۳	۶-۳ محاسبه انحراف استاندارد
۴۴	فصل چهارم: نتایج و بحث
۴۴	۱-۴ ارزیابی کیفیت ظاهری جوش
۴۷	۲-۴ سیکل حرارتی جوش
۴۹	۳-۴ تشکیل و توزیع فازها
۵۱	۴-۴ تحولات ریزساختاری
۵۳	۱-۴-۴ فلزات پایه
۵۴	۲-۴-۴ ناحیه متأثر از حرارت (HAZ) در سمت فولاد St ۳۷
۵۶	۳-۴-۴ ناحیه متأثر از عملیات ترمومکانیکی (TMAZ) در سمت فولاد ۳۱۶
۵۷	۴-۴-۴ ناحیه اغتشاشی (SZ)
۶۱	۵-۴ آزمون پراش الکترونی از الکترون‌های برگشتی (EBSD)
۶۱	۱-۵-۴ فلزات پایه
۶۳	۲-۵-۴ نمونه‌های جوشکاری شده
۶۶	۶-۴ ارزیابی خواص مکانیکی
۶۶	۱-۶-۴ آزمون کشش
۶۷	۲-۶-۴ آزمون سوراخ برشی
۷۱	۳-۶-۴ آزمون ریزسختی سنجی
۷۴	۷-۴ ارزیابی خواص خوردگی
۷۴	۱-۷-۴ آزمون تافل
۷۷	۲-۷-۴ آزمون غوطه وری
۷۹	فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها
۷۹	۱-۵ نتیجه‌گیری
۸۱	۲-۵ پیشنهادها
۸۲	منابع

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
۱-۲ دسته بندی فولادهای زنگ نزن	۶
۲-۲ خالی شدن کروم از مناطق اطراف مرز دانه‌های آستنیت به دلیل تشکیل رسوبات کاربیدی	۸
۲-۳ متداول‌ترین انواع فولاد زنگ نزن آستینیتی	۹
۲-۴ نمودار شبه دو تایی سیستم Fe-Cr-Ni در ۷۰٪ آهن	۱۰
۲-۵ تاثیر سرعت سرد کردن روی تشکیل کاربید و فازهای ثانویه در فولاد زنگ نزن آستینیتی ۳۱۶	۱۱
۲-۶ ارتباط نوع انجماد با نمودار فازی شبه دو تایی	۱۳
۲-۷ تحولات ریزساختاری در مناطق مختلف فولاد کم کربن جوشکاری شده	۱۴
۲-۸ فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی	۱۶
۲-۹ شماتیک از اثر متقابل شانه ابزار در سطح مقطع عرضی جوش	۱۷
۲-۱۰ اصطلاحات مربوط به جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی	۱۹
۲-۱۱ دستگاه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی	۱۹
۲-۱۲ نمایی از یک ابزار جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با پین رزوه دار	۲۰
۲-۱۳ نمایی از نگه دارنده ابزار FSW	۲۰
۲-۱۴ انواع طرح اتصال در فرایند FSW	۲۲
۲-۱۵ سیکل‌های حرارتی اتصال FSW فولاد IF	۲۳
۲-۱۶ طرح‌های مختلف شانه ابزار	۲۶
۲-۱۷ مناطق ریزساختاری مختلف در مقطع عرضی جوش اصطکاکی اغتشاشی	۲۸
۲-۱۸ نمایی از مقطع عرضی جوش دو طرفه FSW	۳۱
۲-۱۹ نقشه‌های EBSD فولاد IF	۳۲
۲-۲۰ انرژی ضربه فلز پایه و نواحی اغتشاشی اتصالات	۳۲
۳-۱ نمایی از ابزار جوشکاری مورد استفاده در این تحقیق	۳۶
۳-۲ نحوه اتصال نمونه‌های جوشکاری	۳۶
۳-۳ دستگاه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی	۳۷
۳-۴ شماتیکی از محل قرارگیری ترموکوپل‌ها در سطح زیری ورق‌های جوشکاری	۳۹
۳-۵ شماتیک تهیه نمونه‌های آزمون کشش	۴۰
۳-۶ شماتیکی از آزمون سوراخ برشی	۴۱
۳-۷ نمودار خام حاصل از آزمون سوراخ برشی	۴۱
۴-۱ شماتیک زاویه ابزار نسبت به جهت عمود بر سطح قطعه کار	۴۴
۴-۲ سطح نمونه جوشکاری شده	۴۵
۴-۳ سطح نمونه‌های جوشکاری شده با سرعت چرخشی ۴۰۰ rpm	۴۵

- ۴-۴ مقطع عرضی نمونه‌های جوشکاری شده با سرعت چرخشی ۴۰۰ rpm ۴۶
- ۴-۵ سطح نمونه‌های جوشکاری شده با سرعت چرخشی ۶۰۰ rpm ۴۶
- ۴-۶ سطح نمونه‌های جوشکاری شده با سرعت چرخشی ۸۰۰ rpm ۴۷
- ۴-۷ نمودار دما - زمان در زیر خط جوش نمونه‌های جوشکاری شده با سرعت چرخشی ۸۰۰ rpm ۴۸
- ۴-۸ نمودار دما - زمان در زیر خط جوش نمونه‌های جوشکاری شده با سرعت پیشروی ۵۰ mm/min ۴۸
- ۴-۹ نمودار دما - زمان ناحیه پیشرو، خط مرکزی و ناحیه پسرو نمونه ۵۰-۶۰۰ ۴۹
- ۴-۱۰ الگوی پراش پرتوی ایکس نمونه ۵۰-۸۰۰ ۵۰
- ۴-۱۱ آنالیز EDS خطی در طول فصل مشترک اتصال در ناحیه SZ ۵۱
- ۴-۱۲ تصویر با بزرگنمایی کم از مقطع عرضی نمونه ۵۰-۸۰۰ ۵۲
- ۴-۱۳ دیاگرام فاز Fe-C و تغییرات ریزساختاری مربوط به فولاد کم کربن St ۳۷ ۵۲
- ۴-۱۴ نمودار شبه دوتایی سیستم Fe-Cr-Ni در ۷۰٪ آهن و تغییرات ریزساختاری مربوط به فولاد AISI ۳۱۶ ۵۳
- ۴-۱۵ ریزساختار فلز پایه فولاد St ۳۷ ۵۳
- ۴-۱۶ ریزساختار فلز پایه فولاد AISI ۳۱۶ ۵۴
- ۴-۱۷ ریزساختار ناحیه HAZ در سمت فولاد St ۳۷ ۵۴
- ۴-۱۸ ریزساختار ناحیه HAZ 1 ۵۵
- ۴-۱۹ ریزساختار ناحیه HAZ 2 ۵۵
- ۴-۲۰ ریزساختار ناحیه TMAZ در سمت فولاد ۳۱۶ ۵۶
- ۴-۲۱ مرز بین ناحیه TMAZ و SZ در سمت فولاد ۳۱۶ ۵۷
- ۴-۲۲ ریزساختار ناحیه SZ در سمت فولاد St ۳۷ ۵۸
- ۴-۲۳ ریزساختار ناحیه SZ در سمت فولاد ۳۱۶ ۵۹
- ۴-۲۴ تصویر با بزرگنمایی کم از مقطع عرضی جوش ۶۱
- ۴-۲۵ تصویر EBSD و ODF مربوط به فلز پایه فولاد زنگ نزن AISI ۳۱۶ ۶۲
- ۴-۲۶ تصویر EBSD و ODF مربوط به فلز پایه فولاد St ۳۷ ۶۲
- ۴-۲۷ تصویر اختلاف جهت گیری مرزخانه‌ها مربوط به فلزات پایه ۶۳
- ۴-۲۸ تصویر EBSD و ODF مربوط به نمونه ۵۰-۸۰۰ ۶۴
- ۴-۲۹ تصویر EBSD و ODF مربوط به نمونه ۵۰-۶۰۰ ۶۵
- ۴-۳۰ تصویر اختلاف جهت گیری مرزخانه‌ها مربوط به نمونه‌های جوشکاری ۶۶
- ۴-۳۱ تقعر ایجاد شده در ناحیه جوش ۶۶
- ۴-۳۲ نمونه آزمون کشش جوشکاری شده با سرعت چرخشی ثابت ۴۰۰ rpm ۶۷
- ۴-۳۳ نمونه آزمون کشش جوشکاری شده با سرعت‌های چرخشی ثابت ۶۰۰ و ۸۰۰ rpm ۶۷
- ۴-۳۴ مقادیر استحکام برشی نهایی مربوط به فلزات پایه و نمونه‌های جوشکاری شده ۶۹
- ۴-۳۵ مقادیر استحکام تسلیم برشی مربوط به فلزات پایه و نمونه‌های جوشکاری شده ۶۹
- ۴-۳۶ مقادیر درصد ازدیاد طول برشی مربوط به فلزات پایه و نمونه‌های جوشکاری شده ۷۰
- ۴-۳۷ نمودار توزیع ریزسختی در مقطع عرضی نمونه ۵۰-۶۰۰ ۷۲

- ۳۸-۴ توزیع ریزسختی نمونه‌های جوشکاری شده با سرعت پیشروی ۵۰ mm/min و چرخشی ۶۰۰ و ۸۰۰ rpm ۷۳
- ۳۹-۴ توزیع ریزسختی نمونه‌های جوشکاری شده با سرعت چرخشی ۸۰۰ rpm ۷۳
- ۴۰-۴ توزیع ریزسختی نمونه‌های جوشکاری شده با سرعت چرخشی ۶۰۰ rpm ۷۴
- ۴۱-۴ نمودار پتانسیل مدار باز مربوط به فلزات پایه و نمونه‌های جوشکاری شده ۷۵
- ۴۲-۴ نمودار تافل مربوط به فلزات پایه و نمونه‌های جوشکاری شده ۷۶
- ۴۳-۴ نمودار تافل مربوط به نمونه‌های ۵۰-۶۰۰ و ۵۰-۸۰۰ ۷۷
- ۴۴-۴ سطح ناحیه نمونه غوطه وری پس از ۲۴ ساعت قرارگیری در محلول ۳/۵ درصد وزنی NaCl ۷۸

فهرست جداول

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۷	۲-۱ خواص گروه‌های مختلف فولادهای زنگ نزن.....
۱۱	۲-۲ رسوبات در فولادهای زنگ نزن آستنیتی.....
۱۲	۲-۳ انواع انجماد، واکنش‌ها و ریزساختارهای حاصل شده.....
۲۱	۲-۴ مزایای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی.....
۲۴	۲-۵ مواد متداول مورد استفاده برای ابزار جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی.....
۲۵	۲-۶ خواص فیزیکی و مکانیکی مواد مورد استفاده در ساخت ابزارها.....
۲۷	۲-۷ انواع پین‌های طراحی شده توسط TWI برای کاربردهای پیشرفته.....
۳۵	۳-۱ ترکیب شیمیایی فلزات پایه.....
۳۸	۳-۲ پارامترهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی.....
۶۰	۴-۱ میانگین اندازه دانه‌ها مربوط به فلزات پایه و ناحیه اغتشاشی نمونه‌های جوشکاری شده.....
۷۶	۴-۲ میانگین پتانسیل و جریان خوردگی مربوط به فلزات پایه و نمونه‌های جوشکاری شده.....

چکیده

در این تحقیق به بررسی تحولات ریزساختاری، تغییرات بافت، خواص مکانیکی و بررسی‌های اولیه در زمینه رفتار خوردگی اتصال غیرمشابه فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI ۳۱۶ به فولاد کم کربن St ۳۷ با استفاده از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی پرداخته شد. برای انجام جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، سرعت‌های چرخشی ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ rpm و سرعت‌های پیشروی ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ mm/min به کار گرفته شد. بررسی‌های فازی توسط آزمون پراش اشعه ایکس (XRD) و آزمون طیفسنجی اشعه ایکس (EDS) و بررسی‌های ریزساختاری توسط میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) انجام شد. تغییرات بافت نمونه‌ها با استفاده از آزمون پراش الکترونی از الکترون‌های برگشتی (EBSD) بررسی شد. خواص مکانیکی اتصال با استفاده از آزمون کشش، آزمون سوراخ برشی و آزمون ریزسختی سنجی مورد ارزیابی قرار گرفت. خواص خوردگی اتصال نیز توسط آزمون تافل و آزمون غوطه‌وری بررسی شد. نتایج نشان داد با استفاده از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی جوش‌های سالم بین این دو فولاد به دست می‌آید. بررسی‌های فازی در مرز اتصال، عدم تشکیل کاربید و ترکیبات بین فلزی را نشان داد. بررسی‌های ریزساختاری نیز مشخص کرد، بیشترین میزان کاهش اندازه دانه‌ها، در ناحیه اغتشاشی سمت فولاد زنگ نزن آستنیتی نمونه جوشکاری شده با سرعت چرخشی ۶۰۰ rpm و سرعت خطی ۵۰ mm/min رخ می‌دهد. آزمون EBSD نشان داد بافت در ناحیه اغتشاشی به سمت صفحات و جهات متراکم تغییر کرده است. نمونه‌های آزمون کشش جوشکاری شده با سرعت چرخشی ثابت ۴۰۰ rpm و سرعت‌های پیشروی ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ mm/min از ناحیه جوش دچار شکست شدند. این درحالی است که محل شکست سایر نمونه‌های جوشکاری شده فلز پایه فولاد St ۳۷ بود. نتایج آزمون سوراخ برشی بیشترین استحکام برشی نهایی و بیشترین استحکام تسلیم برشی را برای نمونه جوشکاری شده با سرعت چرخشی ۶۰۰ rpm و سرعت پیشروی ۵۰ mm/min نشان داد. با این وجود این نمونه کمترین میزان ازدیاد طول را داشت. بیشترین میزان ریزسختی در ناحیه اغتشاشی سمت فولاد AISI ۳۱۶ نمونه جوشکاری شده با سرعت چرخشی ۶۰۰ rpm و سرعت خطی ۵۰ mm/min به دست آمد. نتایج بررسی رفتار خوردگی نشان داد اگرچه ناحیه جوش در نمونه‌های جوشکاری شده رفتار خوردگی نزدیک به فلز پایه St ۳۷ دارد، با این وجود پتانسیل خوردگی بالاتر و جریان خوردگی بیشتری از خود نشان می‌دهد. نتایج آزمون غوطه‌وری نیز نشان داد که کمترین میزان مقاومت به خوردگی حفره‌ای مربوط به ناحیه اغتشاشی سمت فولاد St ۳۷ است که دلیل آن می‌تواند افزایش چگالی نایبایی‌ها و مرز دانه‌ها در این ناحیه باشد.

کلمات کلیدی: اتصال غیرمشابه، فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI ۳۱۶، فولاد کم کربن، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، EBSD.

فصل اول

مقدمه

اتصالات غیرمشابه بین فولاد زنگ نزن آستنیتی و فولاد کم کربن در بسیاری از کاربردهای دما بالا مانند خطوط بخار نیروگاه‌ها، مبدل‌های حرارتی، راکتورهای هسته‌ای و صنایع پتروشیمی کاربرد دارد. در این کاربردها بخش‌هایی از قطعه که در معرض دماهای پایین هستند، از فولاد کم کربن و بخش‌هایی که در دماهای بالاتر قرار دارند، از فولاد زنگ نزن آستنیتی ساخته می‌شوند. دلیل استفاده از فولادهای کم کربن این است که در زیر دما و فشار معینی، این فولادها به خوبی عمل نموده و از نظر اقتصادی نیز نسبت به فولادهای زنگ نزن مقرون به صرفه‌تر می‌باشند.

تاکنون محققین زیادی به بررسی این اتصال غیرمشابه با استفاده از انواع روش‌های جوشکاری مانند: جوشکاری قوسی تنگستن - گاز^۱ (GTAW)، جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی^۲ (RSW)، جوشکاری اصطکاکی^۳ (FW)، جوشکاری نقطه‌ای لیزر^۴ (LSW) و جوشکاری پرتو الکترونی^۵ (EBW) پرداخته‌اند. در این تحقیقات تحولات ریزساختاری، خواص مکانیکی و خواص خوردگی اتصال مورد ارزیابی قرار گرفته است.

تحقیقات صورت گرفته نشان می‌دهد به دلیل تفاوت در ضریب انبساط و هدایت حرارتی در اتصال غیرمشابه، تنش حرارتی زیادی به وجود می‌آید. علاوه بر این، تغییرات متالورژیکی ایجاد شده سبب تشکیل فاز فریت دلتا، فاز سیگما و خوردگی مرزدانه‌ای در فصل مشترک جوش شده و جدایش عناصر آلیاژی در حین انجماد را به دنبال دارد. عیوب

^۱ Gas Tungsten Arc Welding

^۲ Resistance Spot Welding

^۳ Friction Welding

^۴ Laser Spot Welding

^۵ Electron Beam Welding

ذکر شده مربوط به حضور فاز مذاب در محل اتصال می‌باشد. اخیراً برای رفع این مشکلات، تحقیقات زیادی روی روش‌های ایجاد اتصال حالت جامد صورت گرفته است.

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی^۱ (FSW) یکی از انواع جدید جوشکاری حالت جامد است که توسط انجمن جوشکاری^۲ (TWI) در سال ۱۹۹۱ اختراع شد. این نوآوری جدید باعث شد تا تکنولوژی اصطکاکی برای تولید جوش‌های پیوسته، بویژه در فلزات سبک^۳ مانند منیزیم، آلومینیوم، مس، روی و غیره مورد استفاده قرار گیرد. اتصالات FSW به دست آمده در این فلزات دارای پیچیدگی کم، بازده قابل قبول و خواص مکانیکی عالی بود. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی روشی برای اتصال قطعات با استفاده از یک ابزار مصرف نشدنی از جنس یک ماده سخت‌تر از فلزات پایه می‌باشد. اختلاف زیاد خواص دمای بالا، بین ابزار و قطعه کار و همچنین حرکت چرخشی مناسب ابزار، حرارت اصطکاکی مناسب برای ایجاد تغییر شکل در قطعه کار را به وجود می‌آورد. این روش می‌تواند به عنوان یک تکنیک اتصال سوراخ کلیدی^۴، بدون فلز پرکننده^۵ و بدون ایجاد فلز مذاب در نظر گرفته شود. بدین ترتیب سرتاسر جوش عاری از عیوب معمول جوشکاری ذوبی است. در حالت معمول هیچ فلز پرکننده مصرف نشدنی یا آماده سازی لبه نیاز نیست. برای FSW مواد با نقطه ذوب بالا مانند تیتانیم، نیکل و فولادها از ابزار با جنس ماده سخت‌تر استفاده می‌شود. زیرا در این روش سایش ابزار یک مشکل اساسی است و می‌تواند بازده تولید را کاهش دهد.

در سال‌های اخیر، FSW برای ایجاد اتصالات غیرمشابه سربه سر^۶ یا لب رو لب^۷ فلزات نرم به نرم یا نرم به سخت به کار رفته است. در زمینه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی فولادها نیز تحقیقات زیادی انجام گرفته است. در این تحقیقات انواع مختلفی از فولادها به یکدیگر جوشکاری شده‌اند. همچنین با استفاده از این روش انواع مختلفی از فولادها به فلزات نرم مانند آلومینیوم و منیزیم یا فلزات سخت مانند تیتانیم جوشکاری شده و انجام اتصال موفقیت آمیز گزارش شده است.

بررسی‌های صورت گرفته نشان می‌دهد، در حالی که FSW اتصال مشابه فولادهای زنگ نزن و فولادهای کم کربن و همچنین اتصال غیرمشابه این فولادها به فلزات دیگر مانند آلومینیوم، تیتانیم و منیزیم بررسی شده است، تحقیقات کمی روی اتصال غیرمشابه فولاد زنگ نزن به فولاد کم کربن به روش FSW گزارش شده است. بنابراین هدف از این تحقیق بررسی اتصال غیرمشابه فولاد زنگ نزن آستینیتی ۳۱۶ AISI به فولاد کم کربن ۳۷ St و بهینه‌سازی پارامترهای جوشکاری (شامل سرعت چرخشی^۸ (ω) و سرعت پیشروی^۹ (v) ابزار) براساس ریزساختار، خواص مکانیکی و رفتار خوردگی اتصال می‌باشد.

^۱ Friction Stir Welding

^۲ The Welding Institute

^۳ Light metals

^۴ Keyhole

^۵ Autogenous

^۶ Butt

^۷ Lap

^۸ Rotational Speed

^۹ Linear Speed

در این پایان نامه، در فصل دوم خواص متالورژیکی فلزات پایه، فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و پارامترهای موثر بر فرایند مانند سرعت چرخشی ابزار، سرعت پیشروی ابزار و هندسه ابزار شرح داده خواهد شد. در انتهای فصل دوم نیز تعدادی از تحقیقات صورت گرفته در زمینه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی فولادها مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در فصل سوم مواد و روش انجام پژوهش بیان می گردد. در فصل چهارم نتایج به دست آمده بیان شده و مورد تجزیه و تحلیل قرار خواهند گرفت. در فصل پنجم از نتایج حاصل نتیجه گیری شده و پیشنهاداتی جهت تکمیل نتایج حاصل از این تحقیق ارائه خواهد شد.

فصل دوم

مروری بر مطالب

۲-۱ معرفی فولادهای زنگ نزن

فولادهای زنگ نزن، گروهی از آلیاژهای پایه آهن هستند که مقاومت به خوردگی و مقاومت به اکسیداسیون بالایی از خود نشان می‌دهند. این فولادها برای زنگ نزن بودن باید حاوی حداقل ۱۰/۵ درصد وزنی کروم باشند. این میزان کروم باعث تشکیل یک سطح غیرفعال اکسیدی می‌شود که از اکسیداسیون فلز زیری، جلوگیری می‌کند. باید توجه داشت که بسیاری از فولادهای حاوی ۱۲ درصد وزنی کروم و حتی بیشتر، هنگامی که در محیط‌های خورنده قرار می‌گیرند دچار خوردگی می‌شوند. دلیل این امر کاهش میزان کروم محلول در زمینه به واسطه تشکیل کاربیدها و سایر ترکیبات است. نوع خوردگی و شدت آن وابسته به نوع محیط خورنده، خواص متالورژیکی ماده و مواردی دیگر همچون شدت تنش‌های موضعی است [۱].

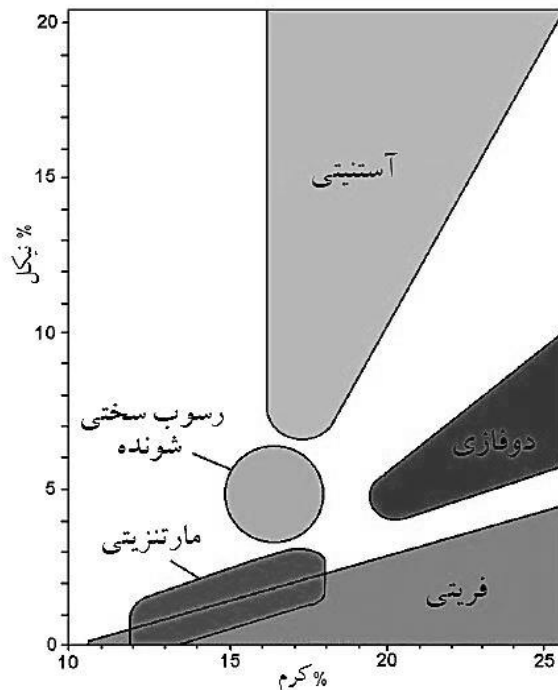
با توجه به آن که در اکثر مواقع فولادهای زنگ نزن به دلیل مقاومت به خوردگی انتخاب می‌گردند، مهندسین طراح باید هنگام طراحی علاوه بر خواص ماده به مواردی همچون محیط استفاده و شرایط کاری نیز توجه کافی داشته باشند. بعضی از انواع فولادهای زنگ نزن مقاومت خوبی در برابر اکسیداسیون، حتی در دماهای بالا دارا هستند و به همین خاطر به عنوان آلیاژهای مقاوم به حرارت شناخته شده‌اند. مقاومت به اکسیداسیون در دمای بالا نیز به خاطر میزان بالای کروم فولاد می‌باشد [۲].

۱-۱-۲ انواع فولادهای زنگ نزن

بر خلاف اغلب مواد که دسته‌بندی آن‌ها بر اساس ترکیب شیمیایی صورت می‌گیرد، دسته‌بندی فولادهای زنگ نزن بر اساس ریزساختار و فازهای تشکیل دهنده آن‌ها است. سه نوع اصلی ریزساختار در فولادهای زنگ نزن وجود دارد: فریتی، آستنیتی و مارتنزیتی. این ریزساختارها با توجه به ترکیب شیمیایی حاصل می‌گردند. بر اساس این ریزساختارهای اصلی، فولادهای زنگ نزن به گروه‌های زیر دسته‌بندی می‌شوند:

- فولادهای زنگ نزن فریتی (۴XX)
- فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی (۴XX)
- فولادهای زنگ نزن آستنیتی (۲XX و ۳XX)
- فولادهای زنگ نزن دو فاز (آستنیتی/فریتی)
- فولادهای زنگ نزن رسوب سختی شونده (PH)^۱

همچنین در بعضی موارد فولادهای زنگ نزن آستنیتی Mn-N به صورت یک گروه مجزا در نظر گرفته می‌شوند. انجمن آهن و فولاد آمریکا (AISI)^۲ به منظور نام‌گذاری فولادهای زنگ نزن از یک سیستم سه شماره‌ای که گاهی با یک یا دو حرف نیز همراه است (برای مثال: ۳۱۶، ۳۰۴L و ۴۳۰) استفاده می‌کند. عبارتی که در دسته‌بندی فوق در پرانتز ذکر شده نشان دهنده گروه مربوطه بر اساس این استاندارد است [۱، ۲]. در شکل ۱-۲ دسته‌بندی فولادهای زنگ نزن بر اساس مقادیر نیکل و کروم نشان داده شده است.



شکل ۱-۲. دسته‌بندی فولادهای زنگ نزن [۳].

^۱ Precipitation Hardening

^۲ American Iron and Steel Institute

گروه‌های مختلف فولادهای زنگ نزن دارای خواص متفاوتی هستند. برای مثال، آستنیتی‌ها غیر مغناطیسی هستند، در حالی که انواع فریتی و مارتنزیتی فرومغناطیس هستند. خواص فیزیکی نظیر رسانایی حرارتی و انبساط حرارتی و همچنین خواص مکانیکی و رفتار خوردگی برای انواع مختلف این فولادها به طور گسترده‌ای تغییر کرده و بر خصوصیات جوشکاری آنها تاثیر می‌گذارد. برای مثال، فولادهای زنگ نزن آستنیتی دارای رسانایی حرارتی و انبساط حرارتی پایینی می‌باشند، که سبب پیچیدگی بیشتر ناشی از جوشکاری در مقایسه با انواع فریتی و مارتنزیتی می‌شود [۲]. در جدول ۱-۲ خواص گروه‌های مختلف فولادهای زنگ نزن آورده شده است.

جدول ۱-۲. خواص گروه‌های مختلف فولادهای زنگ نزن [۳]

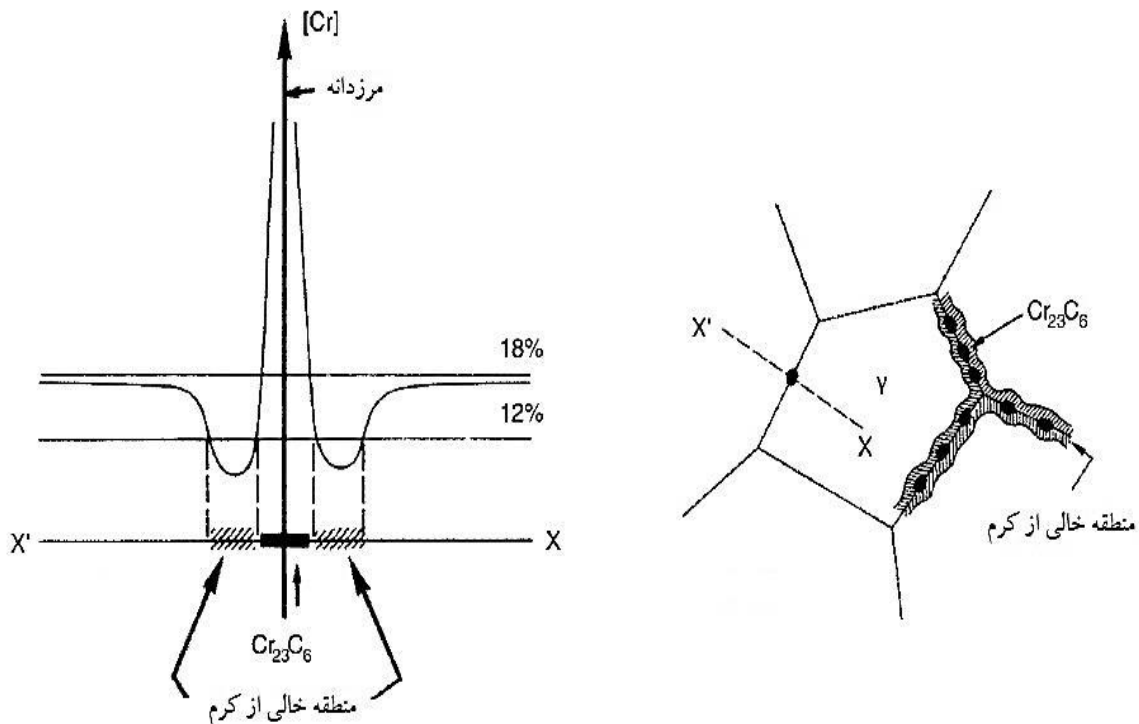
گروه آلیاژ	خواص مغناطیسی	مقاومت به خوردگی	قابلیت سختی پذیری	چقرمگی	مقاومت در دمای بالا	مقاومت در دمای پایین	جوش پذیری
آستنیتی	معمولاً ندارد	زیاد	با کار سرد	خیلی زیاد	خیلی زیاد	خیلی زیاد	خیلی زیاد
دوفازی	دارد	خیلی زیاد	ندارد	متوسط	کم	متوسط	زیاد
فریتی	دارد	متوسط	ندارد	متوسط	زیاد	کم	متوسط
مارتنزیتی	دارد	متوسط	کونچ و تمپر	کم	کم	کم	کم
رسوب سختی شونده	دارد	متوسط	پیرسختی	متوسط	کم	کم	زیاد

۲-۱-۲ مقاومت به خوردگی فولادهای زنگ نزن

یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های فولادهای زنگ نزن که سبب به وجود آمدن و استفاده گسترده آنها شد، مقاومت به خوردگی و حرارت می‌باشد. وجود لایه اکسیدی غنی از کروم سبب می‌شود که این فولادها در برابر خوردگی یکنواخت مقاوم باشند. با این وجود، انواع دیگر خوردگی، مانند خوردگی موضعی می‌تواند سبب از بین رفتن لایه محافظ و خوردگی شدید این فولادها شود [۴].

دو نوع خوردگی موضعی در فولادهای زنگ نزن رخ می‌دهد که شامل خوردگی حفره‌ای و خوردگی شیاری است. مکانیزم و علت وقوع هر دو نوع خوردگی مشابه و ناشی از حملات شدید موضعی عوامل خوردنده می‌باشد. حفره‌دار شدن ناشی از شکسته شدن موضعی لایه غیر فعال است که در برخی از نواحی متالورژیکی مانند مرز دانه‌ها و یا فازهای بین فلزی بیشتر رخ می‌دهد. با شکست لایه غیر فعال، خوردگی به فلز زیر لایه حمله می‌کند و حفره کوچکی در سطح تشکیل می‌شود. با گذشت زمان خواص شیمیایی محلول داخل حفره تغییر می‌کند و میزان خوردندگی آن به شدت افزایش می‌یابد که منجر به خورده شدن سریع زیر سطح شده و به هم پیوستن حفرات مجاور نهایتاً منجر به تخریب می‌گردد. خوردگی شیاری دارای مکانیزم مشابهی است. وجود شیار در ناحیه‌ای می‌تواند باعث تغییر در خواص شیمیایی محلول در آن ناحیه شود. خوردگی شیاری معمولاً در محل اتصالات پیچ، جایی که فضای بین سر

پیچ و سطح آن می‌تواند چنین شیاری را ایجاد کند، رخ می‌دهد. هر دو نوع خوردگی حفره‌ای و شیاری در محلول‌های حاوی یون کلرید (مانند آب دریا) رخ می‌دهد. جوشکاری می‌تواند با تشکیل ریزساختارهایی که باعث تسریع خوردگی حفره‌ای می‌شود یا ایجاد شیارها (نفوذ ناقص، محبوس شدن سرباره و غیره) خوردگی موضعی را تشویق نماید. جوشکاری همچنین می‌تواند با تخریب لایه اکسیدی باعث کاهش مقاومت به خوردگی شود. خطرناک‌ترین نوع خوردگی در فولادهای زنگ نزن جوشکاری شده حمله بین دانه ای (IGA)^۱ و پدیده مرتبط با آن یعنی ترک خوردن خوردگی تنشی بین دانه‌ای (IGSCC)^۲ می‌باشد. این نوع خوردگی معمولاً در ناحیه متأثر از حرارت (HAZ) فولادهای زنگ نزن آستنیتی رخ می‌دهد و حساس شدن^۳ نامیده می‌شود [۱]. حساس شدن در دماهای بالا رخ می‌دهد. در این دماها، کربن که از لحاظ ترمودینامیکی میل ترکیبی زیادی با کروم دارد، کاربید کروم تشکیل می‌دهد. در دمای بالا نفوذ مرزدانه‌ای خیلی بیشتر از نفوذ درون دانه‌ای است و مرز دانه‌ها مکان‌های مناسبی برای جوانه زنی رسوبات می‌باشند. از طرفی نفوذ کربن چندین برابر نفوذ کروم می‌باشد، بنابراین کربن به مرز دانه‌ها نفوذ کرده و با کروم تشکیل کاربید می‌دهد. بدین ترتیب اطراف مرز دانه‌ها از کروم خالی می‌شوند. شکل ۲-۲ مناطق خالی از کروم را نشان می‌دهد. کاهش مقادیر کروم این مناطق به حدی است، که سبب کاهش مقاومت به خوردگی این مناطق نسبت به مناطق دیگر می‌شود. این مناطق، به دلیل کروم کمتر، دارای آستنیت بسیار ناپایدار بوده و کاملاً مستعد تشکیل ماتنزیت می‌باشد [۵].



شکل ۲-۲. خالی شدن کروم از مناطق اطراف مرز دانه‌های آستنیت بدلیل تشکیل رسوبات کاربیدی [۵].

^۱ Intergranular Attack

^۲ Intergranular Stress Corrosion Cracking

^۳ Sensitization