بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مواد

جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای فولاد زنگ‌نزن آستنیتی 304L فوق ریزدانه/ نانوساختار تولید شده به روش ترمومکانیکی مارتنزیت و ارزیابی خواص منطقه اتصال

پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی مواد گرایش جوشکاری

حمید جعفری

اساتید راهنما

دکتر فتح‌اله کریم‌زاده

دکتر محمدحسن عباسی

۱۳۹۳

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مواد

پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی مواد گرایش جوشکاری آقای حمید جعفری

تحت عنوان

جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای فولاد زنگ‌نزن آستنیتی 304L فوق ریزدانه/ نانوساختار تولید شده به روش ترمومکانیکی مارتنزیت و ارزیابی خواص منطقه اتصال

در تاریخ ۱۳۹۳/۱۰/۲۸ توسط کمیته‌ی تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان‌نامه	دکتر فتح‌اله کریم‌زاده
۲- استاد راهنمای پایان‌نامه	پروفسور محمد حسن عباسی
۳- استاد داور	پروفسور مرتضی شمعانیان
۴- استاد داور	دکتر احمد کرمانپور
سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر کیوان رئیسی

تشکر و قدردانی

تحسین سپاس و ستایش از آن خداوندی است که بنده کوچکش را در دریای بیکران اندیشه، قطره‌ای ساخت تا وسعت آن را از دریچهٔ اندیشه‌های ناب آموزگارانی بزرگ به تماشا نشیند. لذا اکنون که در سایه سار بنده نوازی هایشان پایان نامه حاضر به انجام رسیده است، بر خود لازم می دانم تا مراتب سپاس را از بزرگوارانی به جا آورم که اگر دست یاریگرشان نبود، هرگز این پایان نامه به انجام نمی رسید.

از اساتید گرانقدر و بزرگوارم جناب آقای دکتر فتح اله کریم زاده و جناب آقای پروفسور محمد حسن عباسی که نکات عالمانه و نصایح دلسوزانه ایشان به عنوان اساتید راهنما در هدایت این پروژه چراغ راه من بود نهایت تشکر و سپاس را دارم.

از اساتید گرامی جناب آقای پروفسور مرتضی شمعانیان و جناب آقای دکتر احمد کرمانپور که علی رغم مشغله‌های فراوان، زحمت داوری پایان نامه اینجانب را بر عهده گرفتند تشکر و قدردانی می کنم.

از جناب آقای مهندس سهیل صابونی که در تمامی مراحل پروژه افتخار همکاری با ایشان را داشتم کمال تشکر را دارم. از دوستان عزیزم، همکلاسی‌ها و هم خوابگاهی‌های دوست داشتنی که در مدت تحصیل افتخار آشنایی با ایشان را داشته‌ام تشکر ویژه دارم.

سپاس پایانی را به مهربان ترین همراهان زندگیم، به پدر، مادر و خواهر و برادرهای عزیزتر از جانم تقدیم می کنم که حضورشان در فضای زندگی‌ام مصداق بی ریای سخاوت بوده است.

از خداوند متعال، سلامتی و موفقیت روزافزون همه این عزیزان را خواستارم.

حمید جعفری

دی ماه ۱۳۹۳

کلیه‌ی حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،

ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع

این پایان‌نامه متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان

است.

عصاره ی آموخته هایم را تقدیم می کنم به آنان که مهر آسمانی شان آرام بخش رنج های زمینی ام است

به استوارترین تکیه گاهم، دستان پرمهر پدرم

به سبزترین نگاه زندگیم، چشمان سبز مادرم

که هرچه آموختم در مکتب عشق شما آموختم و هرچه بکوشم قطره ای از دریای بی کران مهربانی تان را سپاس نتوانم بگویم . امروز هستی ام به امید شماست و فردا کلید باغ بهشتم رضای شما

ره آوردی گران سنگ تر از این ارزان نداشتم تا به خاک پایتان نثار کنم، باشد که حاصل تلاشم نسیم گونه غبار خستگی تان را بزداید.

بوسه بر دستان پرمهرتان

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب ..... هشت

فهرست شکل ها ..... یازده

فهرست جدول ها ..... چهارده

چکیده ۱

فصل اول ۲

مقدمه ۲

فصل دوم ۵

مروری بر مطالب ۵

۲-۱ فولادهای زنگ نزن ۵

۲-۲ تاریخچه فولادهای زنگ نزن ۵

۲-۳ فولادهای زنگ نزن آستنیتی ۶

۲-۳-۱ ریزکردن دانه ها ۸

۲-۴ فولادهای فوق ریزدانه/ نانوساختار ۹

۲-۵ روش های تولید فولادهای فوق ریزدانه/ نانوساختار ۱۰

۲-۵-۱ فرایندهای تغییر شکل پلاستیکی شدید ۱۰

۲-۵-۲ فرایندهای ترمومکانیکی پیشرفته ۱۰

۲-۶ نورد سرد فولادهای زنگ نزن آستنیتی نیمه پایدار و آنیل آن ۱۱

۲-۷ تشکیل مارتنزیت در فولادهای زنگ نزن آستنیتی ۱۳

۲-۸ بازگشت مارتنزیت به آستنیت فوق ریزدانه ۱۵

۲-۹ جوشکاری فولادهای فوق ریزدانه ۱۶

۲-۱۰ راهکارهای موثر در جوشکاری فولادهای فوق ریزدانه/ نانوساختار ۱۷

۲-۱۰-۱ کنترل میزان حرارت ورودی در فرایندهای جوشکاری ذوبی ۱۷

۲-۱۰-۲ استفاده از خنک کننده هایی نظیر نیتروژن مایع در پشت منطقه جوش ۱۸

۲-۱۰-۳ استفاده از فرایندهای جوشکاری ذوبی پرانرژی ۱۸

۲-۱۱ فرایند جوشکاری مقاومتی ۱۹

۲-۱۲ جوشکاری مقاومتی نقطه ای ۲۰
۲-۱۲-۱ پارامترهای موثر در جوشکاری مقاومتی نقطه ای ۲۰
۲-۱۳ جوشکاری مقاومتی نقطه ای فولادها / فولادهای زنگ نزن ۲۳
۲-۱۳-۱ تحولات ریزساختاری در جوشکاری مقاومتی نقطه ای ۲۴
۲-۱۳-۲ بررسی ساختاری توسط آنالیز پرتو الکترونی برگشتی (EBSD) ۲۹
۲-۱۳-۳ خواص مکانیکی ناحیه اتصال در جوشکاری مقاومتی نقطه ای ۳۱
۲-۱۳-۴ بررسی سطوح شکست در دکمه جوش ۳۶
۲-۱۴ خلاصه و جمع بندی ۴۰
فصل سوم ۴۱
روش تحقیق ۴۱
۳-۱ مواد اولیه ۴۱
۳-۲ تولید فولاد فوق ریزدانه / نانو ساختار ۴۲
۳-۲-۱ نورد سرد شدید ۴۲
۳-۲-۲ آنیل بازگشتی ۴۲
۳-۳ جوشکاری فولاد AISI 304L ۴۲
۳-۳-۱ آماده سازی نمونه ها ۴۲
۳-۳-۲ جوشکاری نمونه ها ۴۳
۳-۴ روند انجام آزمایش ها در این پژوهش ۴۴
۳-۵ آزمون های مشخصه یابی ۴۵
۳-۵-۱ آنالیز کوانتومتری ۴۶
۳-۵-۲ آنالیز فازها (پراش پرتو ایکس) ۴۶
۳-۵-۳ آنالیز فریت سنجی ۴۶
۳-۵-۴ متالوگرافی و میکروسکوپ نوری ۴۶
۳-۵-۵ میکروسکوپ الکترونی روبشی ۴۶
۳-۵-۶ آزمون پراش الکترونی از الکترون های برگشتی (EBSD) ۴۷
۳-۵-۷ آزمون کشش و برش -کشش ۴۷
۳-۵-۸ سختی سنجی ۴۷

۳-۵-۹ ریز سختی سنجی ۴۷
فصل چهارم ۴۸
نتایج و بحث ۴۸
۴-۱ مقدمه ۴۸
۴-۲ تولید فولاد به روش فرایند ترمومکانیکی مارتنزیت ۴۸
۴-۲-۱ بررسی تغییرات فازی در حین فرایند ترمومکانیکی ۴۹
۴-۲-۲ بررسی های ریزساختاری ۵۱
۴-۲-۳ ارزیابی استحکام نمونه های فرایند ترمومکانیکی مارتنزیت ۵۴
۴-۲-۴ بررسی سطوح شکست نمونه های فرایند ترمومکانیکی مارتنزیت ۵۵
۴-۳ جوشکاری مقاومتی نقطه ای فولاد AISI 304L ۵۹
۴-۳-۱ بررسی های ساختاری ۶۰
۴-۳-۲ آنالیز پراش الکترونی از الکترون های برگشتی ۶۶
۴-۳-۳ تاثیر شدت جریان و زمان جوشکاری بر خواص مکانیکی ۷۲
۴-۳-۴ تاثیر شدت جریان و اندازه دانه بر خواص مکانیکی ۷۷
۴-۳-۵ مشخصه های سختی ۸۰
۴-۳-۶ بررسی سطوح شکست ۸۳
فصل پنجم ۸۵
نتیجه گیری و پیشنهادها ۸۵
۵-۱ نتیجه گیری ۸۵
۵-۲ پیشنهادها ۸۷
فهرست منابع ۸۸

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۲- ۱. تاثیر اندازه دانه بر افزایش استحکام تسلیم فولادهای زنگ نزن آستنیتی AISI 304 ..... ۸
شکل ۲- ۲. ارتباط بین ازدیاد طول و اندازه دانه ۹
شکل ۲- ۳. شماتیکی از فرایند نورد سرد و آنیل فولادهای آستنیتی نیمه پایدار ۱۲
شکل ۲- ۴. ریزساختار به دست آمده پس از هر مرحله در روش نورد سرد ۱۳
شکل ۲- ۵. نمودار تنش – دما در فولادهای زنگ نزن آستنیتی نشان دهنده مکانیزم های غالب تشکیل مارتنزیت ۱۴
شکل ۲- ۶. اثر دما و میزان کرنش بر کسر حجمی مارتنزیت ناشی از کرنش در آزمون کشش ۱۵
شکل ۲- ۷. شماتیکی از مکانیزم های بازگشت نفوذی و برشی در بازگشت مارتنزیت به آستنیت ریزدانه ۱۶
شکل ۲- ۸. مقایسه دانه بندی ناحیه متاثر از حرارت و فلز پایه فولادی فریتی ۱۷
شکل ۲- ۹. تاثیر حرارت ورودی بر اندازه دانه منطقه جوش و ناحیه متاثر از حرارت فولاد فوق ریزدانه ۱۹
شکل ۲- ۱۰. شمائی کلی از فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه ای ۲۲
شکل ۲- ۱۱. نمونه ای از ریزساختار فولاد زنگ نزن ۳۰۴L جوشکاری شده به روش RSW ۲۵
شکل ۲- ۱۲. ریزساختار فولاد کم کربن فوق ریزدانه جوشکاری شده به روش RSW ۲۵
شکل ۲- ۱۳. ریزساختار فولاد AISI 304 در دکمه جوش و ناحیه HAZ ۲۶
شکل ۲- ۱۴. a) باندهای لغزشی در ریزساختار دکمه جوش فولاد AISI 304 ..... ۲۶
شکل ۲- ۱۵. ریزساختار فولاد Cr18-Ni9-Ti1 جوشکاری شده به روش مقاومتی نقطه ای ۲۸
شکل ۲- ۱۶. a) تصویر کامل ریزساختار (Image quality) b) تصویر نقشه ی جهت گیری (IPF) ۳۰
شکل ۲- ۱۷. جهت گیری دانه ها در جهت های مختلف دانه در ناحیه فلزجوش و HAZ ۳۱
شکل ۲- ۱۸. نمودار نیرو - جابجایی در آزمون برش کشش و نحوه ی محاسبه انرژی شکست ۳۲
شکل ۲- ۱۹. نقشه حد فاصل نیروی شکست بر حسب شدت جریان و زمان جوشکاری ۳۲
شکل ۲- ۲۰. نمودار آزمون برش کشش نمونه با میزان گرمای ورودی متفاوت به قطعه ۳۳
شکل ۲- ۲۱. نمودار تغییر نیروی برش کشش شکست بر حسب تغییر میزان شدت جریان در دو اتمسفر متفاوت ۳۳
شکل ۲- ۲۲. نمودار سیکل خستگی فولاد ۳۰۴ جوش داده شده با اندازه دکمه ی جوش متفاوت ۳۴
شکل ۲- ۲۳. تغییرات سختی در حالت جوش مناسب (a) افقی، (b) عمودی ۳۶
شکل ۲- ۲۴. تصویر شماتیک حالت های معمول شکست که طی آزمون مکانیکی روی می دهد ۳۷
شکل ۲- ۲۵. سطح شکست یک جوش نقطه ای که طی آزمون کشش عرضی IF شکست شده است ۳۹
شکل ۲- ۲۶. سطح شکست یک جوش نقطه ای که طی آزمون کشش عرضی PF شکست شده است ۳۹
شکل ۳- ۱. شماتیک نمونه های آماده شده جهت جوشکاری مقاومتی نقطه ای ۴۳
شکل ۳- ۲. شماتیکی از محل ایجاد دکمه جوش و الکترودها در جوشکاری مقاومتی نقطه ای ۴۴
شکل ۳- ۳. روند نمای انجام پروژه ۴۴
شکل ۴- ۱. شماتیکی از روند تولید فولاد ریزدانه و فولاد فوق ریزدانه / نانو ساختار AISI 304L ۴۹
شکل ۴- ۲. منحنی تغییرات میزان مارتنزیت ناشی از کرنش بر حسب درصد کاهش در ضخامت نورد سرد فولاد ۴۹

شکل ۴- ۳. الگوی پراش پرتو ایکس نمونه های نورد شده در کاهش ضخامت های متفاوت ۵۰
شکل ۴- ۴. الگوی پراش پرتو ایکس نمونه های آنیل بازگشتی شده در دمای ۷۰۰ درجه سانتی گراد ۵۱
شکل ۴- ۵. تصاویر میکروسکوپی نوری و الکترونی از تشکیل مارتنزیت در حین نورد ۵۱
شکل ۴- ۶. ساختار میکروسکوپی الکترونی روبشی فولاد AISI 304L الف) نمونه اولیه ۵۲
شکل ۴- ۷. نمودار توزیع اندازه دانه در فولاد فوق ریزدانه AISI 304L ۵۳
شکل ۴- ۸ تصاویر میکروسکوپی نوری از فولاد AISI 304L ۵۳
شکل ۴- ۹. نمودار تنش – کرنش مهندسی فولاد AISI 304L با اندازه دانه های مختلف ۵۴
شکل ۴- ۱۰. تصاویر سطح شکست (الف – ب) نمونه ۹۰٪ نورد شده (ج – ه) نمونه فوق ریزدانه ۵۶
شکل ۴- ۱۱. سطح شکست نمونه های آزمون کشش (الف- ب) نمونه با اندازه دانه ۳ میکرومتر ۵۷
شکل ۴- ۱۲. نمودار فراوانی نسبی دیمپل های تشکیل شده در سطح شکست فولاد با اندازه دانه متفاوت ۵۸
شکل ۴- ۱۳. نمودار شیفلر جهت موقعیت یابی فولاد AISI 304L روی نمودار ۵۹
شکل ۴- ۱۴. نمودار ۱۹۹۲ – WRC شامل مرزهای نحوه انجماد ۶۰
شکل ۴- ۱۵. ارتباط نوع انجماد با نمودار فازی شبه دوتایی ۶۰
شکل ۴- ۱۶. مناطق مختلف حاصل از جوش نقطه ای در اندازه دانه های متفاوت ۶۱
شکل ۴- ۱۷. ریزساختار سه ناحیه مختلف حاصل از جوشکاری مقاومتی نقطه ای ۶۲
شکل ۴- ۱۸. ریزساختار نقطه جوش در فولاد فوق ریزدانه با کد A_{30} ۶۳
شکل ۴- ۱۹. نمونه ی A_{30} شامل ساختار دندریتی همراه با رشد شاخه های فرعی ۶۳
شکل ۴- ۲۰. حضور فاز فریت دلتا با مرفولوژی مختلف ۶۴
شکل ۴- ۲۱. رشد رونشستی (الف) تصویر شماتیک نحوه چینش دانه ها ۶۵
شکل ۴- ۲۲. تصویر با بزرگنمایی کم از مقطع عرضی جوش نمونه فولاد فوق ریزدانه ۶۶
شکل ۴- ۲۳. تصاویر EBSD مربوط به ناحیه ی یک دکمه ی جوش فولاد فوق ریزدانه ۶۷
شکل ۴- ۲۴. نمودار مربوط به عدم تطابق دانه ها در ناحیه ی یک دکمه ی جوش فولاد فوق ریزدانه. ۶۸
شکل ۴- ۲۵. تصاویر EBSD مربوط به ناحیه ی دو جوش فولاد فوق ریزدانه ۶۹
شکل ۴- ۲۶. نمودار مربوط به عدم تطابق دانه ها در ناحیه دو ۷۰
شکل ۴- ۲۷. تصاویر EBSD مربوط به ناحیه ی سه دکمه ی جوش فولاد فوق ریزدانه ۷۱
شکل ۴- ۲۸. نمودار مربوط به عدم تطابق دانه ها در ناحیه سه ۷۲
شکل ۴- ۲۹. نمودار نیروی شکست نقطه جوش فولاد فوق ریزدانه در شدت جریان و زمان جوشکاری متفاوت ۷۳
شکل ۴- ۳۰. نقشه حد فاصل نیروی شکست فولاد فوق ریزدانه در شدت جریان و زمان جوشکاری متغیر ۷۴
شکل ۴- ۳۱. تصویر سه بعدی نمودار نیروی شکست در آزمون برش کشش ۷۴
شکل ۴- ۳۲. نقشه حد فاصل قطر دکمه جوش در فولاد فوق ریزدانه بر حسب شدت جریان و زمان جوشکاری ۷۵
شکل ۴- ۳۳. نقشه سه بعدی تاثیر شدت جریان و زمان جوشکاری روی قطر دکمه جوش ۷۶
شکل ۴- ۳۴. نمودار نیرو – جابجایی و نحوه ی محاسبه ی انرژی شکست ۷۶
شکل ۴- ۳۵ نمودار انرژی شکست بر حسب شدت جریان و زمان جوشکاری در نمونه های U_1 تا U_{36} ۷۷
شکل ۴- ۳۶. بیرون آمدن دکمه ی جوش (PF) در آزمون برش کشش نمونه D_{18} ۷۸

شکل ۴- ۳۷. نمودارهای تاثیر اندازه دانه و شدت جریان بر میزان نیروی شکست ۷۹
شکل ۴- ۳۸. نمودار نیرو – جابجایی در آزمون برش کشش نمونه های A_{18}، B_{18}، C_{18}، D_{18} ۸۰
شکل ۴- ۳۹. نمودار ریز سختی در طول دکمه جوش فولاد فوق ریزدانه A_{30} , A_{18} ۸۱
شکل ۴- ۴۰. نمودار ریز سختی در عرض دکمه جوش فولاد فوق ریزدانه A_{30} ۸۲
شکل ۴- ۴۱. نمودار ریزسختی نمونه های فوق ریزدانه (A_{18})، ریزدانه (B_{18}, C_{18}) و نمونه خام اولیه (D_{18}). ۸۲
شکل ۴- ۴۲. تصویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی از سطح شکست نمونه A_{18} ۸۳
شکل ۴- ۴۳. تصویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی از ناحیه شکست ۸۳
شکل ۴- ۴۴. تصویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی از ناحیه شکست ۸۴

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول ۲- ۱. ترکیب شیمایی برخی فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی ۷
جدول ۲- ۲. تحقیقات گروهی از محققین در زمینه ی جوشکاری مقاومتی نقطه ای فولادها..... ۲۳
جدول ۳- ۱. ترکیب شیمیایی فولاد 304L ۴۳
جدول ۳- ۲. ابعاد نمونه آزمون برش کشش..... ۴۳
جدول ۳- ۳. محدوده پارامترهای انتخابی جوشکاری مقاومتی نقطه ای فولادهای زنگ نزن ۴۳
جدول ۳- ۴. راهنمای کد گذاری نمونه فولاد فوق ریزدانه با توجه به پارامترهای تعیین شده ۴۵
جدول ۳- ۵. راهنمای کد گذاری نمونه ها با توجه به پارامترهای تعیین شده..... ۴۵
جدول ۴- ۱. ارتباط بین میزان آستنیت بازگشتی و میزان سختی نمونه ها در آنیل در دمای ۷۰۰ °C ۵۰
جدول ۴- ۲. نتایج حاصل از نمودار تنش کرنش ۵۵
جدول ۴- ۳. اندازه دانه ناحیه متاثر از حرارت دکمه جوش با اندازه دانه متفاوت فلز پایه ۶۲
جدول ۴- ۴. میانگین درصد فاز فریت موجود در ریزساختار دکمه جوش ۶۶
جدول ۴- ۵. مقادیر عددی قطر دکمه ی جوش و نیروی شکست و محاسبه تنش شکست ۷۸

چکیده

در این پژوهش به منظور رفع خواص ضعیف مکانیکی فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI 304L و بهره مندی از ویژگی‌های مناسب آن در صنایع، ابتدا فولاد فوق ریزدانه/ نانوساختار به روش ترمومکانیکی مارتنزیت تولید و سپس به روش جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای جوشکاری شد. نمونه‌های فولاد در ابعاد mm ۱۰*۴۰*۸۰ آماده سازی شده و به روش نورد سرد شدید تا ۹۰٪ کاهش در ضخامت نورد انجام گرفت. سپس نمونه‌ها در دماهای °C ۷۰۰ و °C ۹۰۰ به مدت زمان ۵ الی ۳۶۰ دقیقه جهت ایجاد ساختار فوق ریزدانه و ریزدانه آستنیتی آنیل شد. نمونه‌های تولید شده، با اندازه دانه مختلف به روش جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای با پارامترهای مختلف، شدت جریان ۶ الی ۳۵ کیلو آمپر، نیروی الکترود ۴ کیلو نیوتن، و مدت زمان جوشکاری ۶ الی ۱۸ سیکل (۰/۳ – ۰/۱ ثانیه) جوشکاری شد. جهت تعیین فازهای تولید شده در طی فرایند نورد و آنیل فولاد از آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) و فریتوسکوپی استفاده شد. بررسی ریزساختارها به کمک میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) صورت پذیرفت. جهت بررسی ریزساختار حاصل از جوش از آنالیز پرتو الکترونی برگشتی (EBSD) استفاده شد. در الگوی پراش پرتو ایکس نمونه‌های نورد و آنیل شده به ترتیب استحاله آستنیت به مارتنزیت و برعکس دیده شد. بررسی ریزساختار حاصل ازآنیل نشان داد که آنیل در دمای °C ۷۰۰ و زمان ۱۲۰ دقیقه منجر به تولید فولاد فوق ریزدانه / نانوساختار با اندازه دانه ۴۰۰ نانومتر و آنیل در دمای °C ۹۰۰ و زمان‌های ۵ و ۱۸۰ دقیقه منجر به تولید فولاد با اندازه دانه‌ی به ترتیب ۳ و ۱۲ میکرومتر شد. استحکام کششی نمونه فولاد فوق ریزدانه ۱۰۶۰ مگا پاسکال با ازدیاد طول ۴۸٪ و سختی ۳۳۰ ویکرز بدست آمد. بررسی‌های حاصل از ریزساختار ناحیه جوش توسط EBSD، نشان از وجود ساختار ریختگی دکمه‌ی جوش همراه با شکل گیری فاز زمینه آستنیت در ساختار و حدود ۳٪ فاز فریت دلتا داد. شکست ناشی از آزمون برش کشش به دو صورت شکست در فصل مشترک و بیرون آمدن دکمه‌ی جوش اتفاق افتاد. شکست ناشی از بیرون آمدن دکمه‌ی جوش به عنوان ایده‌آل‌ترین نوع شکست در آزمون برش کشش انتخاب شد. بیشترین نیروی برش کشش دکمه‌ی جوش در فولاد فوق ریزدانه در شرایط جوشکاری با پارامترهای، شدت جریان ۳۰ الی ۳۵ کیلو آمپر، زمان جوشکاری ۱۸ سیکل (۰/۳ s) و نیروی الکترود ۴ کیلو نیوتن (۸۰ MPa) به میزان ۱۲۰۰۰ نیوتن و سختی فلز جوش حدود ۲۵۰ ویکرز بدست آمد. نتایج حاصل از جوشکاری نمونه‌ها در اندازه دانه‌های متفاوت نشان از کاهش نیروی شکست با افزایش اندازه دانه داد. سختی دکمه‌ی جوش در نمونه فوق ریزدانه در مقایسه با نمونه‌های با اندازه دانه ۳، ۱۲ میکرومتر و نمونه فولاد اولیه بالاتر بود. سطوح شکست نمونه‌های جوشکاری شده در هر دو حالت شکست نشان داد که شکست دکمه‌ی جوش به صورت نرم همراه با تشکیل دیمپل بوده است. جهت کشیده شدن دیمپل‌ها در راستای اعمال نیرو نشان داد که شکست ناشی از دکمه‌ی جوش ماهیتی برشی کششی دارد.

کلمات کلیدی

فولاد 304L، فوق ریزدانه/ نانو ساختار، جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای، فرایند ترمومکانیکی پیشرفته، پرتو الکترونی برگشتی (EBSD).

فصل اول

مقدمه

فولادهای زنگ‌نزن شامل گروهی از فولادهای پرآلیاژ بر پایه سیستم‌های Fe-Cr ، Fe-Cr-C و Fe-Cr-Ni می‌باشند. کاربرد وسیع فولادهای زنگ‌نزن در صنایع مختلف به علت در برداشتن خواص مکانیکی و مقاوم به خوردگی خوب در محیط‌های مختلف، از دیرباز مورد توجه قرار گرفته است. فولادهای زنگ‌نزن به پنج دسته تقسیم می‌شوند، فولادهای زنگ‌نزن آستینتی، فریتی، مارتنزیتی، ترکیبی(آستنیتی فریتی) و فولادهای زنگ‌نزن رسوب سخت شونده. در طول چند سال اخیر، استفاده از مواد از جنس فولادهای زنگ‌نزن به طور مداوم در برنامه‌های مختلف صنعتی افزایش یافته است. این فولادها به طور فزاینده‌ای برای ساخت کشتی‌ها، وسایل آشپزخانه، مواد ساختمانی، صنعت حمل و نقل و کاربردهای صنعت پزشکی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این مواد علاوه بر خواص منحصر به فردی چون مقاومت به خوردگی بالا و ظاهری زیبا دارای خاصیت جوش‌پذیری خوبی نیز می‌باشند.

کاربرد فراوان این‌گونه فولادها صنعت را برآن داشته است تا با انواع مختلف روش‌های اتصال نظیر جوشکاری بتوان قطعات مورد نیاز را تولید نمود. فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی با انواع روش‌های جوشکاری قوس الکتریکی، مقاومتی، شعله و لحیم کاری قابل متصل شدن می‌باشند. واضح است بر حسب نوع قطعه و کاربرد آن، تعداد و هزینه‌ها، فرایند مناسب انتخاب می‌شود. برخلاف ویژگی‌های خوب، این فولادها دارای استحکام تسلیم پایین و در حدود ۳۰۰-۲۰۰ مگا پاسکال می‌باشند، که کاربرد آن‌ها را در برخی از صنایع با دشواری و محدودیت همراه می‌سازد. و از آن‌جایی که ریزساختار فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی در تمامی محدوده‌های دمایی فاز آستنیت می‌باشد، لذا با استفاده از عملیات حرارتی نمی‌توان تغییرات خاصی در استحکام و سختی آن‌ها حاصل نمود. روش‌هایی از قبیل تشکیل محلول جامد، ایجاد کارسختی، رسوب سختی و ریزکردن دانه‌ها از عمده‌ترین روش‌های افزایش استحکام هستند.

اکثر روش‌ها در ازای افزایش استحکام، کاهش شدید چقرمگی را به همراه دارند، اما از میان همه‌ی روش‌های ذکر شده تنها مکانیزمی که هم‌زمان با افزایش استحکام قطعه بهبود چقرمگی را نیز به همراه دارد مکانیزم ریزدانه کردن است. این خاصیت منحصر به فرد موجب توجه صنعت و جوامع علمی به فولادهای فوق ریزدانه/ نانوساختار (UFG[۱]) گشته است. روش‌های تولید فولاد فوق ریزدانه را عمدتاً می‌توان به دو دسته کلی روش‌های تغییر شکل پلاستیکی شدید (SPD[۲]) و فرایندهای ترمومکانیکی پیشرفته تقسیم‌بندی نمود. روش‌های ترمومکانیکی پیشرفته به دلیل قابلیت کنترل در دمای بالا، فرایندهای بسیار ساده‌تر و با قابلیت صنعتی شدن بیشتری هستند.

به دلیل توسعه روزافزون صنایع خودروسازی و اهمیت استحکام قطعات و بدنه خودرو، استفاده از فلزات با استحکام و انعطاف پذیری بالا مانند فولادهای آستنیتی فوق ریزدانه اهمیت فوق العاده‌ای یافته است. هر خودروی امروزی بین ۲۰۰۰ تا ۵۰۰۰ جوش نقطه‌ای دارد. کیفیت و رفتار مکانیکی جوش‌های مقاومتی نقطه‌ای به طور قابل توجهی قابلیت اعتماد به خودرو در شرایط تصادف را تحت تاثیر قرار می‌دهد. جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای (RSW[۳]) فرایندی است که در آن اتصال دو سطح توسط حرارت ناشی از مقاومت در برابر عبور جریان الکتریکی و فشار تواماً انجام می‌گیرد. مدت زمان جوشکاری یک نقطه جوش در این فرایند یک سیکل نامیده می‌شود که شامل مدت زمان روشن نمودن و گرم شدن دستگاه، زمان اعمال فشار روی قطعه کار و مدت زمان برداشتن الکترودها از روی قطعه کار تا شروع سیکل بعدی می‌باشد. از جمله مهمترین پارامترهای متغیر در این نوع جوشکاری می‌توان به زمان جوش (WT[۴])، جریان جوشکاری (WC[۵])، نیروی الکترود (EF[۶]) اشاره نمود. خواص مکانیکی از جمله استحکام کششی فلز جوش در این نوع جوشکاری علاوه بر پارامترهای ذکر شده به اندازه منطقه‌ی جوش داده شده نیز بستگی دارد. کنترل کیفیت جوش، کنترل و بهینه کردن پارامترهای جوشکاری در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای بسیار مهم می‌باشد. زیرا این کار بهبود خواص مکانیکی را به همراه دارد. از فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای به طور گسترده‌ای برای اتصال ورق‌های فلزی در صنعت خودروسازی استفاده می‌شود. کیفیت و عملکرد جوش نقطه‌ای تأثیر قابل توجهی بر ایمنی و عمرکاری وسیله نقلیه دارد. در یک واگن حدود ۱۰[۴] دکمه جوش وجود دارد که کیفیت آن‌ها مستقیماً متناسب با قابلیت اطمینان و ایمنی قطارهای در حال حرکت می‌باشد. وجود یک یا دو جوش نقطه‌ای معیوب در محل‌های بحرانی خودرو می‌تواند سلامت سازه‌ای خودرو را تحت تاثیر قرار دهد. بنابراین تا حد امکان باید از تشکیل چنین جوش‌هایی جلوگیری نمود. به دلیل عدم وجود یک روش بازرسی غیر مخرب دقیق در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای و عدم اطمینان از کیفیت جوش‌های نقطه‌ای موجب می‌شود جهت اطمینان از قسمت‌های مختلف اتصال یافته در حدود ۳۰ درصد بیش از حد نیاز جوشکاری انجام شود. هزینه چشم‌گیر مربوط به این جوش‌های اضافی، عاملی مهم

---

۱ Ultra-Fine Grained
۲ Sever Plastic Deformation
۳ Resistance Spot Welding
۴ Welding Time
۵ Welding Current
۶ Electrode Force

در جهت بهینه سازی این فرایند محسوب می‌شود. به همین دلیل تلاش‌های زیادی جهت به حداقل رساندن تعداد جوش‌های نقطه‌ای انجام شده است. خدا بخشی و همکاران با استفاده از جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای روی ورق‌های فولادی کم کربن فوق ریزدانه تولید شده به روش تغییر شکل پلاستیکی شدید دریافتند که با تغییر میزان شدت جریان اعمالی و زمان جوشکاری در حین فرایند و افزایش گرمای ورودی به قطعه تا حد مشخص، نیروی شکست نیز افزایش می‌یابد. مطالعات محققان در مورد بررسی تغییر پارامترهای جوشکاری بر میزان جوش‌پذیری فولاد ۳۰۴ال و ۳۰۴ در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای نشان می‌دهد که ضخامت ورق، اندازه ناحیه ذوب و میزان سختی فلز جوش، از عوامل کلیدی درکنترل نوع شکست جوش‌های نقطه‌ای هستند. نتایج حاصل از بررسی ریزساختار، ریزسختی سنجی و آزمون برش کشش نشان می‌دهد که با بهینه نمودن پارامترها در این نوع جوشکاری می‌توان به خواص مکانیکی بسیار مطلوبی دست یافت. بیشتر تحقیقات انجام شده در مورد جوش‌های نقطه‌ای و نحوه‌ی بهینه سازی پارامترهای آن در مورد اتصالات با ریزساختار معمولی انجام گرفته است اما به دلیل استفاده روزافزون از فولادهای زنگ‌نزن فوق ریزدانه/ نانوساختار در صنایع ذکر شده، نیاز به ایجاد اتصالی مناسب با کمترین افت خواص مکانیکی در منطقه‌ی اتصال بسیار حائز اهمیت می‌باشد.

هدف اصلی از انجام این پروژه، جوشکاری موفقیت آمیز فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی فوق ریزدانه/ نانو ساختار تولید شده به روش ترمومکانیکی مارتنزیت با استفاده از روش جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای است. همچنین با بررسی تاثیر پارامترهای متغیر این فرایند جوشکاری بر ریزساختار و کیفیت فلز جوش نظیر خواص مکانیکی، به بررسی تاثیر اندازه دانه فلز پایه بر کیفیت منطقه اتصال جوش پرداخته و در نهایت پارامترهای بهینه در این نوع فرایند جوشکاری بیان می‌شود.

فصل دوم

مروری بر مطالب

۲-۱ فولادهای زنگ‌نزن

فولادهای زنگ‌نزن گروه وسیعی از آلیاژهای ویژه‌اند که بیشتر برای مقاومت در برابر خوردگی توسعه یافته‌اند. این گروه، آلیاژهایی برپایه آهن شامل حداقل ۱۰/۵ درصد کروم هستند. تعداد کمی از فولادهای زنگ‌نزن حاوی بیش از ۳۰ درصد کروم یا کم‌تر از ۵۰ درصد آهن هستند. ویژگی ضد زنگی این فولادها به‌واسطه‌ی تشکیل لایه‌ی نازک چسبنده و غیر قابل تشخیص اکسید غنی از کروم روی سطح حاصل می‌شود. این اکسید با وجود اکسیژن روی سطح تشکیل شده و قابلیت خود ترمیمی نیز دارد. عناصر دیگر شامل نیکل، مولیبدن، مس، تیتانیم، آلومینیم، سیلیسیم، نیوبیوم، نیتروژن، گوگرد و سلنیم به‌منظور دستیابی به ویژگی خاص به ترکیب فولاد زنگ‌نزن اضافه می‌شوند. کربن معمولاً در محدوده‌ی کم‌تر از ۰/۰۳ تا بیش‌از ۱/۰ (در نوع مارتنزیتی) در ترکیب شیمیایی وجود دارد. انتخاب فولادهای زنگ‌نزن می‌تواند براساس مقاومت به خوردگی، ویژگی‌های ساخت، در دسترس بودن، خواص مکانیکی در محدوده‌ی دمایی خاص و قیمت تولید باشد [۱-۴].

۲-۲ تاریخچه فولادهای زنگ‌نزن

کشف ابتدایی و توسعه‌ی فن‌آوری فولاد زنگ‌نزن در انگلستان و آلمان در حدود سال ۱۹۱۰ میلادی آغاز شد. تولید تجاری و استفاده از فولادهای زنگ‌نزن در سال ۱۹۲۰ میلادی در ایالات متحده آمریکا شروع شد. مشکل دست‌یابی به عناصر آلیاژی (مخصوصاً نیکل) در سال‌های ۱۹۵۰ میلادی باعث توسعه‌ی مجموعه‌ای از آلیاژها (نوع AISI 200) شد که در آن‌ها نیتروژن و منگنز جایگزین نیکل شدند. روش‌های پالایش نوین در اوایل سال ۱۹۷۰ میلادی باعث

ایجاد تحولی در ذوب فولاد زنگ‌نزن شد. نیتروژن یک عنصر آلیاژی است که به آسانی کنترل می‌شود و گوگرد و اکسیژن نیز می‌تواند به‌طور استثنائی تا حد پایینی کاهش یابد. و منجر به بهبود مشخصی در تصفیه‌ی فولاد شود. در این سال‌ها، فولادهای زنگ‌نزن به طور فزاینده‌ای برای ساخت کشتی‌ها، وسایل آشپزخانه، مواد ساختمانی، صنعت حمل و نقل،کاربردهای صنعت پزشکی، ابزار تزئینی، تجهیزات برای استفاده کارخانه‌های شیمیایی و کارخانه‌های لبنیات و غذایی، کاربردهای بهداشتی و سلامتی، کارخانه های پتروشیمی و نفت، کارخانجات نساجی و صنایع حمل و نقل و دارویی استفاده شده است [۵, ۶].

نام‌هایی برای فولادهای زنگ‌نزن به‌وسیله ترکیب سیستم‌های ایالات متحده آمریکا طراحی گردیده است. پراستفاده ترین سیستم نام‌گذاری انجمن آهن و فولاد آمریکا (AISI[۱]) است. بر اساس این استاندارد فولادهای زنگ‌نزن به پنج دسته کلی زیر تقسیم بندی می‌شوند.

الف- فولادهای زنگ‌نزن مارتنزیتی

ب- فولادهای زنگ‌نزن فریتی

ج- فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی

د- فولادهای زنگ‌نزن ترکیبی(آستنیتی فریتی)

هـ- فولادهای زنگ‌نزن رسوب‌سخت شونده [۱, ۵, ۶].

۲-۳ فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی

دارای ساختار وجوه مرکزدار (FCC)[۲] هستند. این ساختار به واسطه‌ی استفاده‌ی قابل توجه از عناصر آستنیت‌زا مانند نیکل، منگنز و نیتروژن به‌دست آمده است. اصولاً این فولادها در حالت آنیل‌شده غیر مغناطیسی هستند و فقط توسط کار سرد می‌توانند سخت شوند. این دسته از فولادها معمولاً استحکام به دماهای بالای مناسب و خواص تبریدی بسیار خوبی دارند. مقدار کروم عموماً از ۱۶ تا ۲۶ درصد تغییر می‌کند و مقدار نیکل تا حدود ۳۵ درصد و منگنز تا ۱۵ درصد است. فولادهای سری ۲xx حاوی نیتروژن، ۴ تا ۱۵/۵ درصد منگنز و تا ۷ درصد نیکل هستند. نوع ۳xx شامل مقادیر بیشتری نیکل و تا ۲ درصد منگنز هستند. مولیبدن، مس، سیلیسیم، آلومینیم، تیتانیوم و نیوبیوم ممکن است برای دست‌یابی به ویژگی‌های خاصی مانند مقاومت به خوردگی حفره‌ای یا مقاومت به اکسیداسیون به ترکیب شیمیایی فولاد اضافه شود. در جدول ۲- ۱ ترکیب شیمیایی برخی فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی آورده شده است. به منظور بهبود تراش کاری در برخی موارد گوگرد یا سلنیم اضافه می‌شود [۵].

این فولادها، معرف بزرگ‌ترین گروه‌های عام فولادهای زنگ‌نزن هستند. به دلیل شکل‌پذیری عالی، چقرمگی زیاد در دمای اتاق و دمای بالا و مقاومت خوب در برابر پوسته شدن، اکسایش و خزش در دماهای بالا بیشترین کاربرد را در صنعت به خود اختصاص داده و در تناژ بالاتری نسبت به سایر گروه‌ها تولید می‌شوند. خواص ضربه‌ای دمای پایین

---

[۱] American Iron and Steel Institute

[۲] Face-Centered Cubic

برای این آلیاژها خوب است به طوری کـه باعـث اسـتفاده از آن‌هـا در کاربردهـای سـرمازایی شـده اسـت. فولادهـای زنگ‌نزن آستنیتی به طور قابل توجهی با کارسرد، استحکام دهی می‌شوند. خصلت اصلی فولادهای زنگ‌نزن مقاومـت در برابر زنگ زدگی است (داشتن کرم بیش از ٪۱۲ موید همین مطلب است). نیکل موجود در ایـن فولادهـا حتـی بـه مقدار زیاد هم نمی‌تواند به تنهایی مقاومت در برابر خوردگی را زیاد کند. ولی با حضور کرم می‌تواند تـا حـد زیـادی این وظیفه را به خوبی انجام دهد. مزیـت اصـلی نیکـل تسـهیل ایجـاد فـاز آسـتنیت و بهبـود خاصـیت مقـاوم بـه ضـربه فولادهای کرم نیکل‌دار است. مولیبدن شرایط خنثی سازی این فولاد را تثبیت می‌کند و عموما عامل افـزایش مقاومـت به خوردگی موضعی[۱] است. به منظور اطمینان از تشکیل کاربیدهای پایدار که باعث افزایش مقاومت به خوردگی بـین دانه‌ای می‌شود افزودن تیتانیوم و نیوبیوم به انواع معینی از فولادهای کرم نیکل‌دار ضروری است [۶].

جدول ۲- ۱. ترکیب شیمایی برخی فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی [۷]

نوع فولاد	ترکیب شیمیایی (درصد وزنی)							
	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	سایر
201	0.15	5.5-7.5	1.00	16.0-18.0	3.5-5.5	0.06	0.03	0.25N
201L	0.03	5.5-7.5	1.00	16.0-18.0	3.5-5.5	0.06	0.03	0.25N
202	0.15	7.5-10	1.00	17.0-19.0	4.0-6.0	0.06	0.03	0.25N
301	0.15	2.0	1.00	16.0-18.0	6.0-8.0	0.045	0.03	...
301L	0.03	2.0	1.00	16.0-18.0	6.0-8.0	0.045	0.03	...
302	0.15	2.0	1.00	17.0-19.0	8.0-10.0	0.045	0.03	...
303	0.15	2.0	1.00	17.0-19.0	8.0-10.0	0.20	0.15 min	0.6 Mo
304	0.08	2.0	1.00	18.0-20.0	8.0-10.5	0.045	0.03	...
304L	0.03	2.0	1.00	18.0-20.0	8.0-12.0	0.045	0.03	...
304N	0.08	2.0	1.00	18.0-20.0	8.0-10.5	0.045	0.03	0.10-0.16 N
304LN	0.03	2.0	1.00	18.0-20.0	8.0-12.0	0.045	0.03	0.10-0.16 N
308	0.08	2.0	1.00	19.0-21.0	10.0-12.0	0.045	0.03	...
309	0.2	2.0	1.00	22.0-24.0	12.0-15.0	0.045	0.03	...
310	0.25	2.0	1.50	24.0-26.0	19.0-22.0	0.045	0.03	...
316	0.08	2.0	1.00	16.0-18.0	10.0-14.0	0.045	0.03	2.0-3.0 Mo
316L	0.03	2.0	1.00	16.0-18.0	10.0-14.0	0.045	0.03	2.0-3.0 Mo
316N	0.08	2.0	1.00	16.0-18.0	10.0-14.0	0.045	0.03	2.0-3.0 Mo; 0.10-0.16 N
316LN	0.03	2.0	1.00	16.0-18.0	10.0-14.0	0.045	0.03	2.0-3.0 Mo; 0.10-0.16 N
321	0.08	2.0	1.00	17.0-19.0	9.0-12.0	0.045	0.03	5 * %C min Ti
347	0.08	2.0	1.00	17.0-19.0	9.0-13.0	0.045	0.03	10 * %C min Nb

فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی مواد ترجیحی برای استفاده در کاربردهای بدنه قطارها و وسایل نقلیه ریلی می‌باشـند. ایـن مواد پیش‌تر قابلیت خود برای استفاده در بدنه و جداره اتوبوس‌ها را ثابت کرده‌اند. تجربیات کسب شده در ایـن زمینـه را می‌توان در صنعت خودرو سازی نیز به کار گرفت. فولاد زنگ‌نزن یک گزینه مناسب برای کاربردهای سازه و بدنه خودروها می‌باشد. این ماده علاوه بر صرفه جـویی در وزن، توانـایی تحمـل تصـادف و مقاومـت بـه خـوردگی، قابـل بازیافت نیز هست. فولاد زنگ‌نزن ترکیبی از خواص مناسب مکانیکی و مقاومت به آتـش سـوزی را بـه همـراه شـکل پذیری عالی دارا می‌باشد. تحت ضربه، فولاد زنگ‌نزن پراستحکام جذب انرژی زیادی نسبت به نـرخ کـرنش از خـود نشان می‌دهد. این ماده برای خودروهای فضایی مفهومی نیز بسیار مناسب است [۸].

استحکام این فولادها برابر با فولادهای نرم می‌باشد به طوری که استحکام تسلیم آن‌ها در دمای محیط ۲۰۰-۳۰۰MPa است. پایین بودن استحکام، به خصوص استحکام تسـلیم، ایـن فولادهـا برخـی از کاربردهـای ایـن دسـته از مـواد را بـا محدودیت روبه‌رو ساخته است. از آن‌جایی که ریزساختار فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی در تمامی محدوده‌های دمـایی

[۱] Pitting