

اثر ایجاد روکش کامپوزیتی نیتريد وانادیم به روش جوشکاری توپودری بر سختی فولاد کربنی

سیدرضا امیرآبادی زاده

رضا اسلامی فارساني*

زهره هاشمی

حسین ابراهیم نژادخالجیری

گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

دانشیار، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران،

ایران

دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران،

ایران

چکیده

سخت کاری سطحی یکی از پرکاربردترین روش‌ها برای بهبود خواص سطحی است. در این تحقیق، عملیات سخت کاری سطحی بر روی فولاد ساده کربنی با استفاده از تشکیل نیتريد وانادیم بررسی شد. بدین منظور سه لایه جوش بر روی سطح فولاد St37 با استفاده از فرآیند جوشکاری توپودری توسط الکترود توپودری حاوی عنصر وانادیم با درصد پرشوندگی ۱۷ درصد، با پاس‌های ۴، ۳ و ۲ بر روی سطح فولاد لایه گذاری شدند. برای بررسی سختی سطحی و شناسایی تشکیل نیتريد وانادیم از آزمون سختی سنجی، پراش اشعه X و میکروسکوپ نوری استفاده شد. نتایج به دست آمده از پراش اشعه X تشکیل رسوب‌های نیتريد وانادیم و نیتريد آهن را نشان داد. همچنین فهمیده شد که این نیتريد‌ها عامل اصلی افزایش سختی سطحی هستند. نتایج سختی سنجی نشان داد که با افزایش فاصله، سختی از ۱۶۳ ویکرز برای فلز پایه تا ۳۶۵ ویکرز در سطح افزایش یافته است. بررسی ریزساختاری توسط میکروسکوپ نوری نشان داد که نیتريد وانادیم مانع از رشد آستنیت اولیه و باعث تشکیل دانه‌های فریت ریزتر در ریزساختار لایه‌های جوش و در نتیجه بهبود خواص شده است.

واژه‌های کلیدی: روکش کامپوزیتی، نیتريد وانادیم، جوشکاری توپودری، سخت کاری سطحی.

Effect of creating Vanadium Nitride Composite Coating through Flux Cored Arc Welding on the hardness of Carbon Steel

S. R. Amirabadizadeh

R. Eslami-Farsani

Z. Hashemi

H. Ebrahimnezhad-Khaljiri

Department of Mechanical Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Faculty of Materials Science and Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

Faculty of Materials Science and Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

Faculty of Materials Science and Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

Abstract

Surface hardening is one of the most popular ways for improving surface properties. In this research, surface hardening operation on low carbon steel was investigated via formation of vanadium nitride. To do so, three weld layers with 4, 3 and 2 passes on the surface of St37 steel were cladded by using flux cored arc welding via flux cored electrode containing 17% vanadium element. For investigating surface hardening and identifying the formation of vanadium nitride, hardness measurement test, x-ray diffraction and optical microscope were used. Obtained result from x-ray diffraction showed the formation of vanadium nitride and iron nitride precipitants. It was also found that these nitrides are main factor in surface hardening of low carbon steel. The result of hardness measurement showed that with increasing distance from base metal surface, the hardness has increased from 163 HV for base metal to 365 HV on surface. Microstructure investigation demonstrated that vanadium nitride precipitation was prevented to grow initial austenite and was caused the formation of finer ferrite in the microstructure of weld layers and consequently, the improvement of properties.

Keywords: Composite Coating, Vanadium Nitride, Flux Cored Arc Welding, Surface Hardening.

شیمیایی^۵ و فیزیکی رسوب بخار^۶ افزایش داد [۵]. سخت‌پوشی در تکنولوژی جوشکاری، به رسوب فلز پرکننده^۷ بر روی فلز پایه (زمینه) برای بهره‌مندی از برخی ویژگی‌های مطلوب در سطح اشاره می‌کند که این ویژگی‌ها در فلز پایه وجود ندارد. انواع مختلفی از سخت‌پوشی

۱- مقدمه

به طور کلی، سختی و مقاومت سایشی سطح مواد را می‌توان از طریق روش‌های مختلف بهبود سطح نظیر پاشش پلاسما^۱، پاشش حرارتی^۲، سخت‌پوشی^۳، روکش‌دهی توسط لیزر^۴ [۱-۴] و فرآیندهای

⁴ Laser Cladding

⁵ Chemical Vapor Deposition

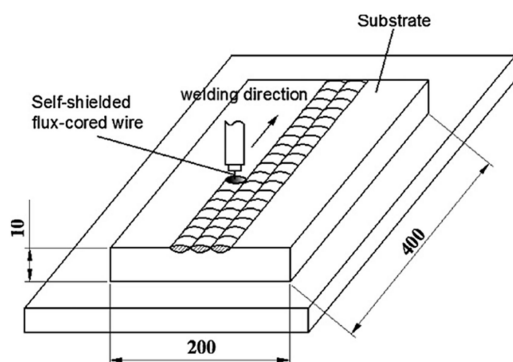
⁶ Physical Vapor Deposition

⁷ Filler Metal

¹ Plasma Spray

² Thermal Spray

³ Hardfacing



شکل ۱- رسوب آلیاژ سخت‌پوشی در فرآیند جوشکاری توپودری [۱۲]

یک سیم جوش توپودری اغلب شامل یک لوله از جنس فولاد کربنی کم کربن و مقادیری پودر شامل عناصر آلیاژی تکمیلی است که در داخل لوله قرار گرفته و فشرده شده است. پودر داخل سیم دارای مزایا و کاربردهای بسیاری است که مهم‌ترین آنها عبارتند از [۱۱]:

- ۱- در اثر سوختن و تولید گاز محافظ، حوضچه جوش را از ورود گازهای محیطی و به ویژه اکسیژن و هیدروژن حفاظت می‌نماید.
- ۲- با تشکیل سرباره روی سطح فلز جوش از تاثیر گازها و ناخالصی‌های محیطی روی حوضچه جوش در جریان انجماد جلوگیری به عمل آورده و از سریع سرد شدن آن جلوگیری به عمل می‌آورد.
- ۳- پایداری قوس الکتریکی برقرار شده و جرقه‌های جوش را کاهش می‌دهد.

۴- افزودن عناصر آلیاژی مورد نیاز به ساختار جوش برای دستیابی به ترکیبات آلیاژی متنوع برای جوشکاری انواع آلیاژها رسیدن به خواص مکانیکی مطلوب را فراهم می‌کند.

یکی از مهم‌ترین گازهای محافظ در جوشکاری، گاز نیتروژن است که باعث تشکیل نیتrideهای فلزی می‌شود. تشکیل نیتrideهای آهن، آلومینیوم، تیتانیوم و وانادیم در فولاد منجر به افزایش قابل توجه در خواص سایشی می‌شود [۱۳، ۱۴]. سیستمی که بیشترین تحقیقات روی آن انجام شده، سیستم نیتريد تیتانیوم است [۱۵]. فرآیندهای جوانه‌زنی و رشد رسوبات نیتريد تیتانیوم در هنگام سخت‌کاری سطحی تحت گاز نیتروژن به این صورت است که ابتدا در اثر حرارت قوس و تشکیل پلاسما، گاز نیتروژن موجود در محیط اطراف فعال، و اتم‌های تیتانیوم یونیزه می‌شوند و این نیتروژن فعال شده براساس قانون فشارهای جزئی (قانون سیورت)^{۱۶} جذب سطح می‌شود. سپس این نیتروژن در مقیاس زمانی میلی ثانیه از طریق نفوذ یا جابجایی در فلز منتقل می‌شود. با توجه به آنتالپی‌ها، فاز نیتريد تیتانیوم به‌وجود می‌آید. پس از جوانه‌زنی این فاز، براساس گرادیان‌های دمایی، مورفولوژی‌های خاصی در فصل مشترک جامد- مذاب ایجاد می‌شود. اندازه دانه و تنش ناشی از این فازها خواص ماکروسکوپی و همچنین خواص تریبولوژیکی را بهبود می‌دهد [۲].

^{۱۴} Gas-Shielded Flux Cored Wires

^{۱۵} Flux-Shielded Flux Cored Wires

^{۱۶} Sievert Law

فلزات از جمله سخت‌کاری سطحی^۱، ترمیم یا بازسازی^۲، لایه‌نشانی^۳ و روکش‌دهی توسط جوشکاری^۴ وجود دارد [۶].

واژه روکش‌دهی با جوشکاری به معنی اعمال یک لایه نسبتاً ضخیم (حدود ۳ میلی‌متر) از فلز جوش به منظور ایجاد یک سطح مقاوم به خوردگی و بهبود خواص سایشی است [۷]. روکش‌دهی با جوشکاری اغلب توسط یکی از فرآیندهای جوشکاری دستی توسط الکتروود روپوش‌دار^۵، جوشکاری تحت گاز محافظ^۶، جوشکاری با گاز محافظ و الکتروود تنگستنی^۷، جوشکاری پلاسما^۸، جوشکاری الکترواسلگ^۹ و جوشکاری توپودری^{۱۰} انجام می‌شود [۷].

فرآیند جوشکاری توپودری یک فرآیند جوشکاری با سرعت بالا است که در صنایع برای اتصال بین فلزها و آلیاژها به کار می‌رود. این فرآیند دارای مزایایی شامل سرعت رسوب بالا، مقاومت بیشتر در برابر زنگ‌زدگی نسبت به فرآیند جوشکاری با گاز محافظ، سادگی و سازگاری بیشتر نسبت به فرآیند جوشکاری دستی توسط الکتروود روکش‌دار، نیاز به مهارت کمتر، امکان تولید بیشتر و شکل ظاهری مناسب‌تر در صنایع تعمیراتی می‌باشد. همچنین این فرآیند قابلیت جوشکاری ورق‌ها با ضخامت بالا را دارد. این مزایا باعث شده است تا در سال‌های اخیر جوشکاری توپودری مورد توجه قرار گیرد [۸، ۹]. عملکرد خوب این فرآیند به خاطر ایجاد قوس مناسب بین قطعه کار و فلز پرکننده می‌باشد. هسته الکتروود توخالی شامل عناصر آلیاژی فلز پایه، دی‌اکسیدکننده‌ها، عناصری برای زدودن گازهای حل‌نشده^{۱۱}، پایدارکننده‌ها، عناصر تولید سرباره و فلاکس است [۱۰]. به دلیل استفاده از این الکتروود توخالی حرارت کمتری ایجاد شده که باعث کاهش منطقه متأثر از گرما^{۱۲} می‌شود. همچنین تنش پسماند و اعوجاج کمتری ایجاد می‌شود [۸].

در فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی با استفاده از سیم جوش‌های توپودری، گرمای مورد نیاز توسط قوس الکتریکی برقرار شده بین قطعه کار و سیم توخالی محتوی پودر تأمین می‌گردد (شکل ۱). حفاظت حوضچه جوش با گازهای محافظ یا پودر افزودنی (مانند جوشکاری زیرپودری) یا بدون آنها انجام می‌پذیرد. دو پارامتر بسیار مهم و اصلی در این فرآیند، یکی گاز محافظ مصرفی (که به طور معمول نیتروژن، دی‌اکسید کربن یا مخلوط دی‌اکسید کربن و آرگون است) و دیگری سیم توپودری مصرفی خواهند بود. براساس استفاده یا عدم استفاده از ماده محافظ اضافی در جریان جوشکاری، سیم جوش‌های توپودری به سه دسته‌ی زیر تقسیم می‌شوند [۱۱]:

۱- سیم جوش‌های توپودری خود محافظ^{۱۳}

۲- سیم جوش‌های توپودری تحت محافظت گاز^{۱۴}

^۱ Surface Hardening

^۲ Buildup

^۳ Buttering

^۴ Weld Cladding

^۵ Shielded Metal Arc Welding

^۶ Gas Metal Arc Welding

^۷ Gas Tungsten Arc Welding

^۸ Plasma Arc Welding

^۹ Electroslag Welding

^{۱۰} Flux Cored Arc Welding (FCAW)

^{۱۱} Dissolved gases

^{۱۲} Heat affected zone

^{۱۳} Self-Shielded Flux Cored Wires

جدول ۲- پارامترهای جوشکاری

پارامتر	مقدار یا نوع پارامتر
فرآیند	دستی FCAW
دستگاه جوشکاری	GAAM ELECTRIC - PARS MIG - SP501W
قطر سیم (mm)	۱/۲
ولتاژ (V)	۲۱
شدت جریان (A)	۲۱۰
تعداد پاس	۲-۳-۴
تعداد لایه‌ها	۳
گاز محافظ	نیترژن
خلوص گاز (%)	۹۹/۹۹
دبی گاز (L/min)	۱۱
فشار گاز (bar)	۱۴۰
دمای بین پاسی (°C)	۲۰۰
قطبیت	DCEP
سرعت ورود سیم (cm/min)	۶۰۰
طول سیم بیرون از تورچ (mm)	۱۰
سرعت جوشکاری (cm/min)	۸/۸

نمونه‌های جوشکاری شده ابتدا بریده و سپس جهت بررسی ریزساختاری مانع شدند (شکل ۳). در ادامه مطابق استاندارد ASTM E3-01 متالوگرافی شدند. سطوح آماده شده توسط محلول نایتال ۲٪ و مطابق استاندارد ASTM E 407-07 اچ شدند. مطالعه سطوح اچ شده با استفاده از میکروسکوپ نوری OLYMPUS BH-2 ساخت کشور ژاپن انجام شد. برای مطالعه ریزساختاری مناطق مختلف نمونه از استاندارد ASTM E 883-02 استفاده شد.



شکل ۳- تصویر دو نمونه‌ی مانع، پولیش و اچ شده

آزمون پراش پرتو x بر روی نمونه‌ها توسط دستگاه XRD مدل XMD300 ساخت کارخانه‌ی Unisantis آلمان انجام شد. طیف‌های به دست آمده توسط نرم‌افزار X'Pert HighScore Plus تحلیل شده و نوع و مقدار فازها شناسایی شدند. میکروسختی سطح مقطع نمونه‌ها در راستای ضخامت و در ۵ نقطه، توسط دستگاه Microhardness Tester ساخت ژاپن براساس استاندارد ASTM E 384-10 اندازه‌گیری شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- الگوی پراش اشعه x

الگوی پراش پرتو x برای نمونه فولاد ساده کربنی روکش داده شده

شایان ذکر است، بررسی تاثیر نیتريد‌های وانادیم بر روی سختی فولادها نیز توسط محققین انجام شده است [۱۶]. آلایین و همکاران [۱۷] تاثیر وانادیم، نیترژن و سیلیکون بر روی سختی فولاد کربن متوسط کم آلیازی خنک شده تحت محیط هوا را بررسی کردند. میزان وانادیم موجود در نمونه‌های این تحقیق بین ۰/۱۶۳ - ۰/۰۰۵ درصد وزنی بود. میزان سختی به دست آمده در این کار پژوهشی در محدوده ۲۰-۳۰ HRC گزارش شده است.

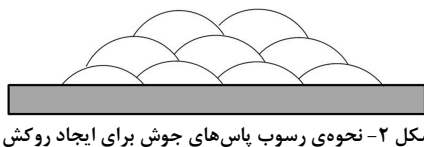
در تحقیقی دیگر هوای و همکاران [۱۸] تاثیر نیتريد وانادیم را بر روی رفتار خستگی فولاد میکروآلیازی کربن متوسط را بررسی کردند. میزان وانادیم موجود در نمونه‌های این تحقیق ۰/۴۵ - ۰/۱۵ درصد وزنی بود. نتایج سختی گزارش شده برای فاز پرلیت و فریت در این تحقیق به ترتیب در محدوده‌های ۲۸۰-۳۲۲ ویکرز و ۲۳۱-۲۸۲ ویکرز قرار داشت.

دینگ و همکاران [۱۹] تاثیر نیتريد وانادیم در پوشش کامپوزیت حاوی پوشش پایه کبالت بر روی فولاد را بررسی کردند. نتایج گزارش شده در رابطه با میزان سختی این پوشش در محدوده ۱۵۰ ویکرز برای فلز پایه و ۴۵۰ ویکرز برای سطح بالایی پوشش بود.

با توجه به تحقیقات انجام شده بیشتر تمرکز محققین بر روی ایجاد پوشش سخت توسط فرآیند جوشکاری توپودری با استفاده از سیم جوش‌های حاوی عنصر تیتانیوم تحت گاز محافظ نیترژن بوده است و سایر عناصر نیتريدساز کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱۵]، [۲۰]. بر این اساس، هدف این تحقیق تمرکز بر روی عنصر نیتريدساز وانادیم و بررسی امکان ایجاد پوشش سخت بر روی فولاد ساده کربنی با استفاده از روش جوشکاری توپودری به همراه سیم جوش حاوی عنصر وانادیم می‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها

قطعه‌ای فولاد St37 نورد شده با ابعاد $20 \times 5 \times 1 \text{ cm}^3$ تهیه شد. سپس بر روی آن سه لایه جوش به ترتیب با پاس‌های ۴، ۳ و ۲ توسط روش جوشکاری توپودری ایجاد شد (شکل ۲). ترکیب شیمیایی سیم جوش استفاده شده و پارامترهای مربوط به فرآیند جوشکاری به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ آورده شده است. سیم جوش حاوی عنصر نیتريدساز وانادیم با استفاده از استاندارد AWS/ASME SFA 5.18 و E70C6 با نسبت پرکنندگی ۱۷ درصد (نسبت وزن پودر به وزن یک متر سیم مفتول) ساخت شرکت صنعتی آما، تهیه و استفاده شد.



شکل ۲- نحوه‌ی رسوب پاس‌های جوش برای ایجاد روکش

جدول ۱- ترکیب شیمیایی مفتول سیم جوش خالص

عناصر	درصد وزنی
کربن	۰/۰۴
سیلیسیم	۰/۵
منگنز	۱/۷
آهن	۹۷/۷۶

ترکیب شیمیایی سیم‌جوش و مقدار بسیار کم آن در فلز پایه St37، فاز M_2X یا به عبارتی دیگر رسوب V_2N در زمینه آهنی تشکیل نمی‌شود و تنها رسوب پایدار در زمینه آهنی در این کار تحقیقاتی رسوب VN می‌باشد که الگوی پراش اشعه x در شکل ۴ این موضوع را ثابت می‌کند [۲۱].

۲-۳- بررسی میکروسکوپی

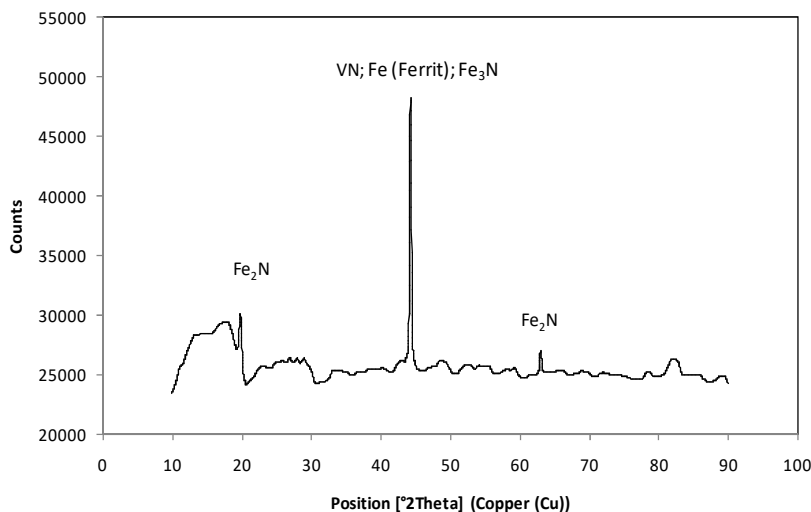
در شکل ۵ ساختار میکروسکوپی فلز پایه قابل مشاهده است. فلز پایه دارای ساختار فریتی- پرلیتی با دانه‌بندی هم‌محور است. در این ساختار حدود ۱۶٪ فاز پرلیت وجود دارد. شکل ۶ ساختار ناحیه متأثر از گرما در فلز پایه است. در این ساختار به دلیل حرارت ایجاد شده در حین جوشکاری یکنواختی ساختار به هم ریخته و توزیع پرلیت در ساختار به صورت غیریکنواخت دیده می‌شود. همچنین مقداری پدیده دسته‌ای شدن در این ساختار وجود دارد.

شکل ۷، مرز بین فلز پایه و لایه اول جوش ایجاد شده بر روی فولاد St37 را نشان می‌دهد که شامل فاز فریت با توزیع اندازه دانه غیریکنواخت و مقداری فاز پرلیت است. همچنین جوانه‌زنی و تبلور مجدد نیز در این ساختار دیده می‌شود. شکل ۸ ریزساختار پاس اول جوش است که شامل دانه‌های ریز و هم‌محور فاز فریت با عدد اندازه دانه حدود ASTM 11-12 (۷/۹-۵/۶ میکرومتر) است. همچنین آثار جوانه‌زنی و تبلور مجدد نیز در ساختار قابل مشاهده است و به علت انحلال فلز جوش و فلز پایه، مقدار کمی پرلیت نیز در ساختار ایجاد شده است.

با سه لایه جوش حاوی عنصر وانادیم در شکل ۴ نشان داده شده است. در این نمونه فازهای فریت و نیتrideهای وانادیم (VN) و آهن (Fe_2N) شناسایی شدند. براساس آنالیز مقداری Rietveld که توسط نرم‌افزار X'Pert HighScore Plus انجام می‌شود، درصد وزنی فاز فریت در نمونه در حدود ۸۰٪ و درصد نیتrideها در حدود ۲۰٪ به دست آمد.

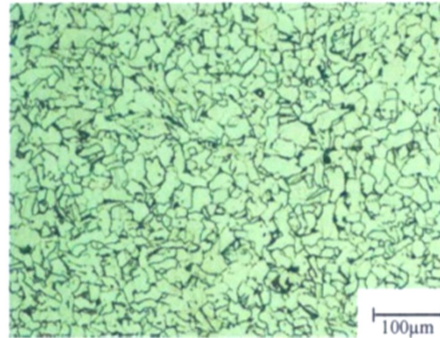
فرآیند جوانه‌زنی و رشد رسوب‌های VN در هنگام سخت‌کاری سطحی تحت گاز نیتروژن به این صورت است که ابتدا در اثر گرمای قوس و پلاسما تشکیل می‌شود، سپس گاز موجود در محیط اطراف (نیتروژن)، فعال و اتم‌های وانادیم را یونیزه می‌کند. در ادامه، این نیتروژن فعال شده براساس قانون فشارهای جزئی (قانون سیورت) جذب سطح نمونه می‌شود. سپس این نیتروژن در مقیاس زمانی میلی ثانیه از طریق نفوذ یا جابجایی، به داخل فلز منتقل می‌شود. در ادامه با توجه به آنتالپی‌ها، فاز نیتride وانادیم تشکیل می‌شود. پس از جوانه‌زنی این فاز، براساس گرادیان‌های دمایی، مورفولوژی‌های خاصی در فصل مشترک جامد- مذاب ایجاد می‌شود که اندازه دانه و تنش ناشی از این فازها تعیین کننده خواص هستند [۲].

براساس مطالعات انجام شده، رسوب‌های فاز نیتride به صورت‌های MX و M_2X (X، فاز انتقالی فلزی و M، فاز انتقالی غیرفلزی) در زمینه آهنی رسوب می‌کنند. این موضوع نشان می‌دهد که در زمینه آهنی فقط فازهای VN و V_2N فاز پایدار بوده و فازهای دیگر شامل $V_{16}N$ ، $V_{13}N$ ، V_9N ، V_8N ، V_7N_2 و V_4N در مذاب ناپایدار هستند. براساس آنالیز ایزوترم جذب نیتروژن و تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری، تشکیل فاز MX نیاز به مقدار زیادی عنصر V و مقدار کم Fe و Cr در زمینه آهنی دارد. در حالی‌که، فاز M_2X نیاز به مقدار زیادی Cr و مقداری V برای تشکیل در زمینه آهنی دارد. به دلیل نبود عنصر Cr در

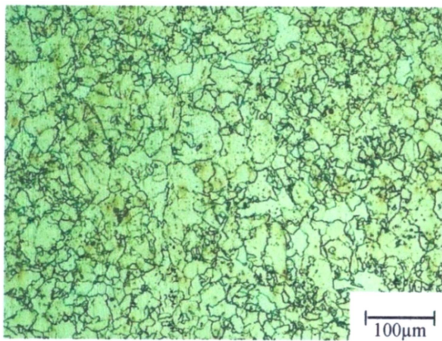


شکل ۴- الگوی پراش اشعه x

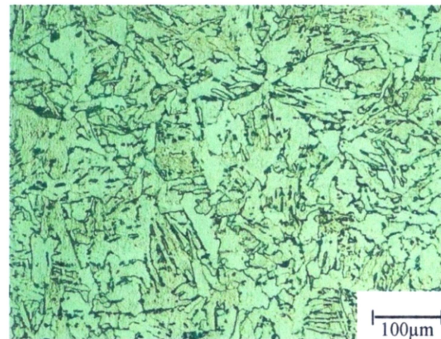
ریزساختار فصل مشترک لایه اول و دوم جوش در شکل ۹ نشان داده شده است که ساختاری مشابه ساختار فصل مشترک فلز پایه و لایه اول جوش دارد، با این تفاوت که در ساختار آن پرلیت مشاهده نمی‌شود و تنها شامل فاز فریت با توزیع اندازه دانه غیریکنواخت است. آثار جوانه‌زنی و تبلور مجدد نیز در آن به چشم می‌خورد. همچنین نسبت به ناحیه مرز فلز پایه و پاس اول جوش، درشت‌شدگی و غیریکنواختی ساختار در آن بیشتر است. شکل ۱۰ نیز ریزساختار لایه دوم جوش را نشان می‌دهد که ساختار آن مشابه همان پاس اول جوش است، با این تفاوت که پرلیت در آن دیده نمی‌شود و شامل دانه‌های ریز و هم‌محور فاز فریت با همان عدد اندازه دانه ASTM 11-12 است.



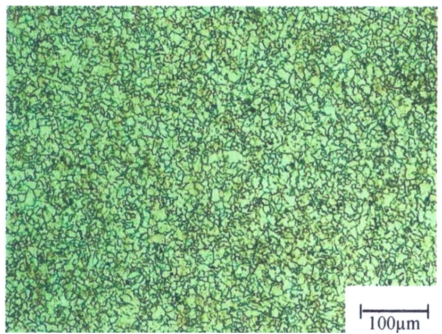
شکل ۵- تصویر میکروسکوپ نوری در بزرگ‌نمایی ۱۰۰X، ریزساختار فلز پایه



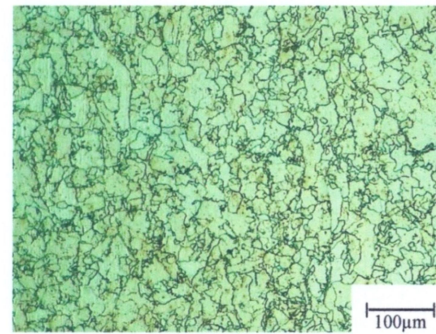
شکل ۹- تصویر میکروسکوپ نوری در بزرگ‌نمایی ۱۰۰X، مرز بین لایه اول و دوم جوش



شکل ۶- تصویر میکروسکوپ نوری در بزرگ‌نمایی ۱۰۰X، منطقه متأثر از گرما در فلز پایه

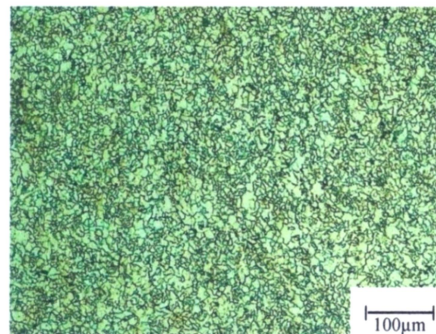


شکل ۱۰- تصویر میکروسکوپ نوری در بزرگ‌نمایی ۱۰۰X، لایه دوم جوش



شکل ۷- تصویر میکروسکوپ نوری در بزرگ‌نمایی ۱۰۰X، مرز بین فلز پایه و لایه اول جوش

ریزساختار ناحیه مرز بین لایه دوم و سوم جوش در شکل ۱۱ نشان داده شده است که ساختاری مشابه مرز بین فلز پایه - لایه اول و لایه اول - لایه دوم دارد و شامل فاز فریت با توزیع اندازه دانه غیریکنواخت است. همچنین شکل ۱۲ ساختار لایه سوم جوش را نشان می‌دهد که این ناحیه دارای فریت با ساختار غیریکنواخت است که بیشترین غیریکنواختی را در مقایسه با دیگر ساختارها دارد. با توجه به شکل‌های ۱۱ و ۱۲ می‌توان مشاهده کرد که دیگر آثار جوانه‌زنی و تبلور مجدد در این دو ناحیه وجود ندارد. همچنین در این ساختار، دانه‌های فریت تشکیل شده در مقایسه با دیگر ساختارهای موجود از فلز پایه تا سطح جوش کوچک‌تر هستند.

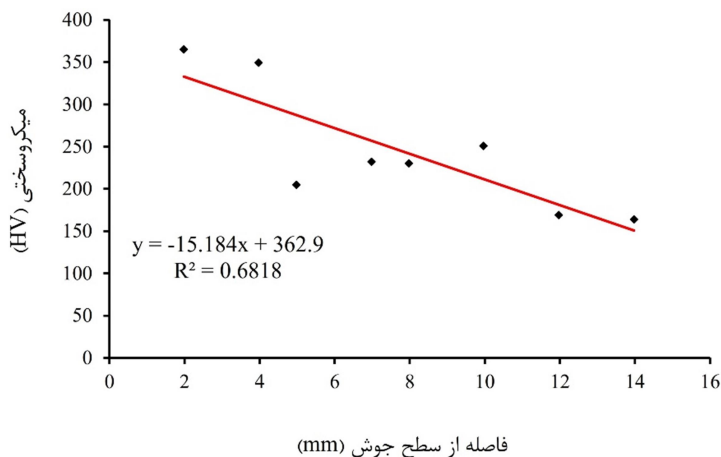


شکل ۸- تصویر میکروسکوپ نوری در بزرگ‌نمایی ۱۰۰X، لایه اول جوش

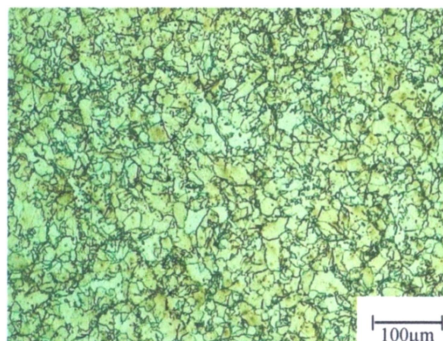
به عبارتی VN تشکیل می‌شود که باعث ریزتر شدن دانه‌های فریت می‌شود. نتایج مطالعه‌های انجام شده نشان می‌دهد که رسوب‌های نیتريد وناديم مانع از رشد دانه‌های آستنیت می‌شوند. این باعث تشکیل دانه‌های اولیه آستنیتی ریزتر می‌شود. با توجه به این نکته، دانه‌های فریت تشکیل شده از این فاز آستنیت ریز، ریزتر از دانه‌های فریت موجود در ساختار فلز پایه هستند [۲۳، ۲۴]. اما به دلیل سرعت سرد شدن غیریکنواخت، دانه‌های تشکیل شده نیز دارای ساختار غیریکنواخت هستند. لازم به ذکر است، گرمای موجود در بین لایه‌ها و نبود زمان مناسب برای سرد شدن باعث شده است تا ساختارهای تشکیل شده در بین مرزهای لایه‌های اول- دوم و دوم- سوم نسبت به دیگر ساختارها درشت‌تر باشند که متاثر از دو عامل هستند. در دماهای بالا (بالتر از 1050°C)، رسوب‌های نیتريد وناديم در زمینه فلزی دچار انحلال شده و عامل جلوگیری کننده از رشد دانه‌های آستنیت اولیه از بین می‌رود [۲۵]. عامل تاثیرگذار دیگر، گرمای موجود می‌باشد که باعث جوانه‌زنی و تبلور مجدد می‌شود. در لایه سوم جوش به دلیل سرعت سرد شدن بالا و عدم انحلال رسوب‌های وناديم، دانه‌های اولیه آستنیت تشکیل شده کوچک‌تر و در نتیجه ساختار فریتی تشکیل شده نیز در مقایسه با دیگر ساختارها کوچک‌تر است، اما این ساختار فریتی نسبت به دیگر ساختارها غیریکنواخت‌تر نیز می‌باشد.

۳-۳- سختی سنجی

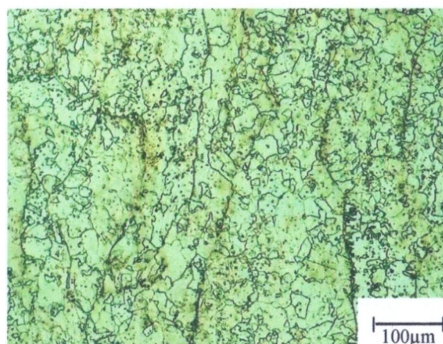
نتایج حاصل از سختی‌سنجی به روش ویکرز در شکل ۱۳ نشان داده شده است. سختی از ۱۶۳ ویکرز برای فلز پایه، تا ۳۶۵ ویکرز برای فلز جوش نزدیک به سطح روندی افزایشی داشته است. با توجه به نتایج پراش پرتو x که بیان‌گر تشکیل نیتريد‌های VN، Fe_2N و Fe_3N است می‌توان گفت این افزایش سختی ناشی از حضور این رسوب‌ها در زمینه است. بنابراین از آنجا که فلز جوش در لایه‌های نزدیک به سطح دارای ساختار فریت ریزدانه است و هم چنین به علت کاهش امتزاج در سطوح بالاتر و افزایش احتمال تشکیل ذرات ریز نیتريد وناديم در لایه‌های بالایی، بیشترین میزان سختی مربوط به ناحیه نزدیک به سطح است.



شکل ۱۳- پروفیل سختی



شکل ۱۱- تصویر میکروسکوپ نوری در بزرگ‌نمایی ۱۰۰X، مرز بین لایه دوم و سوم جوش



شکل ۱۲- تصویر میکروسکوپ نوری در بزرگ‌نمایی ۱۰۰X، لایه سوم جوش

با توجه به بررسی‌های انجام شده، سه عامل سرعت سرد شدن، حرارت ناشی از جوشکاری لایه‌های قبلی و رسوب ذرات وناديم نیتريد در زمینه فریتی از عوامل تاثیرگذار در شکل‌گیری ساختارهای متفاوت فریتی- پرلیتی از فلز پایه تا لایه سوم جوش هستند. در طی فرآیند جوشکاری لایه اول، قسمتی از سطح فلز ذوب و همچنین متاثر از حرارت ناشی از جوشکاری است که باعث تغییر ساختار و درشت‌تر شدن آن و در نتیجه کاهش نسبی خواص می‌شود [۲۲]. در مرز بین فلز پایه و لایه اول و همچنین در لایه اول جوش ذرات اولیه، فاز MX یا

Different Parameters. *Procedia Engineering*, Vol. 41, pp. 1497–1501, 2012.

- [10] Katherasan D., Sathiya P. and Raja A., Shielding Gas Effects on Flux Cored Arc Welding of AISI 316L (N) Austenitic Stainless Steel Joints. *Materials and Design*, Vol. 45, pp. 43–51, 2013.
- [11] معینیان م.، کلید جوشکاری. جلد دوم، انتشارات آزاده، تهران، ۱۳۸۲.
- [12] Yang K., Yu S., Li Y. and Li C., Effect of Carbonitride Precipitates on the Abrasive Wear Behaviour of Hardfacing Alloy. *Applied Surface Science*, Vol. 254, No. 16, pp. 5023–5027, 2008.
- [13] Zhang H., Zou Y., Zou Z. and Wu D., Microstructures and Properties of Low-Chromium High Corrosion-Resistant TiC–VC Reinforced Fe-Based Laser Cladding Layer. *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 622, pp. 62–68, 2015.
- [14] Seifitokaldani A., Gheribi A. E., Dolle M. and Chartrand P., Thermophysical Properties of Titanium and Vanadium Nitrides: Thermodynamically Self-Consistent Approach Coupled with Density Functional Theory. *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 662, pp. 240–251, 2016.
- [15] Bader M., Spies H. J., Hock K., Broszeit E. and Schroder H. J., Properties of Duplex Treated (Gas-Nitriding and PVD -TiN, -Cr₂N) Low Alloy Steel. *Surface and Coatings Technology*, 98(1998)891–896.
- [16] Wang X. J., Li S. R., Liu W. B., Hu Y. H., Liu Y. W., Zhan G. F., Hong X. and Yang X. L., Research on Mechanical Properties and Weldability of Wh360e Plate with VN Micro-Alloying. *Procedia Engineering*, Vol. 130, pp. 475–486, 2015.
- [17] Ollilainen V., Kasprzak W. and Holappa L., The Effect of Silicon, Vanadium and Nitrogen on the Microstructure and Hardness of Air Cooled Medium Carbon Low Alloy Steel. *Journal of Materials processing Technology*, Vol. 134, No. 3, p.p 405–412, 2003.
- [18] Hui W., Chen S., Yongjian Zhang Y., Shao C. and Dong H., Effect of vanadium on the high-cycle fatigue fracture properties of medium-carbon microalloyed steel for fracture splitting connecting rod. *Materials and Design*, Vol. 66, p.p 227–234, 2015.
- [19] Lin Ding L., Hu s., Quan X. and Shen J., Effect of VN alloy addition on the microstructure and wear resistance of Co-based alloy coatings. *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 659, pp. 8–14, 2016.

[۲۰] محمدی خواه م.، ثابت ح.، شکوه فر ع.، محرابیان س. و هادی زاده اکبر.، بررسی و مقایسه ریزساختار، سختی و مقاومت به سایش لایه‌های سخت کامپوزیتی ایجاد شده به روش جوشکاری FCAW حاوی ذرات TiC و TiCN بر روی فولاد ساده کربنی. فصل‌نامه علمی پژوهشی مهندسی مواد مجلسی، ش. ۲، ص ۱–۱۱، ۱۳۸۹.

- [21] Ravi C., First-Principles Study of Ground-State Properties and Phase Stability of Vanadium Nitrides. *Calphad*, Vol. 33, No. 3, pp.469–477, 2009.
- [22] Mostaan H., Shamanian M., Monirvaghefi S. M., Behjati P., Hasani S., Moghaddam M. F., Amiri M. and Szpunar J. A., Analysis and Characterization of Microstructural Evolutions, Mechanical Response and Fracture Mechanism of Laser Welded Fe–Co–V Ultra-Thin Foil. *Optics & Laser Technology*, Vol. 68, pp. 211–219, 2015.
- [23] Yang G. W., Sun X. J., Yong Q. L., Li Z. D. and Li X. X., Austenite Grain Refinement and Isothermal Growth Behavior in A Low Carbon Vanadium Microalloyed Steel. *Journal of Iron and Steel Research, International*, Vol. 21, No. 8, pp. 757–764, 2014.
- [24] Yang G., Sun X., Li Z., Li X. and Yong Q., Effects of Vanadium on the Microstructure and Mechanical Properties of a High Strength Low Alloy Martensite Steel. *Materials and Design*, Vol. 50, pp. 102–107, 2013.
- Stas'ko R., Adrian H. and Adrian A., Effect of Nitrogen and Vanadium on Austenite Grain Growth Kinetics of a Low Alloy

۴- نتیجه‌گیری

در این کار تحقیقاتی، اثر سخت‌کاری سطحی بر روی فولاد ساده کربنی با استفاده از جوشکاری توپودری توسط الکتروود حاوی عنصر نیتريدساز وانادیم بررسی شد. نتایج حاصل از آزمون سختی‌سنجی، پراش اشعه x و بررسی ریزساختاری به صورت خلاصه به شرح ذیل است:

- ۱- الگوی پراش اشعه x تشکیل فاز VN را به عنوان پایدارترین فاز نیتريدی تشکیل شده از وانادیم در زمینه آهنی در مذاب لایه‌های جوش نشان داد. همچنین فازهای Fe₃N و Fe₂N نیز در زمینه آهنی تشکیل شدند.
- ۲- بررسی‌های ریز ساختاری نشان داد که سه عامل سرعت سرد شدن، گرمای ناشی از جوشکاری لایه‌های قبلی و رسوب ذرات نیتريد وانادیم در زمینه فریتی از عوامل تاثیرگذار در شکل‌گیری ساختارهای متفاوت فریتی- پرلیتی از فلز پایه تا لایه سوم جوش هستند.
- ۳- رسوب‌های نیتريد وانادیم مانع از رشد دانه‌های آستنیت اولیه شده و باعث تشکیل ساختار فریتی با دانه‌بندی ریزتر نسبت به دانه‌های فریتی موجود در ساختار فلز پایه شدند.
- ۴- وجود گرمای ناشی از جوشکاری لایه قبلی باعث شده است تا در مرزهای بین لایه‌های جوشکاری، رسوب‌های نیتريد وانادیم در داخل زمینه حل شده و باعث تشکیل ساختار با دانه‌بندی بزرگ‌تر شود.
- ۵- در لایه سوم جوش به دلیل سرعت سرد شدن بالا و عدم انحلال رسوب‌های وانادیم، ساختار فریتی تشکیل شده در مقایسه با دیگر ساختارها کوچک‌تر است، اما این ساختار تشکیل شده غیریکنواخت‌تر نیز می‌باشد.
- ۶- نتایج سختی‌سنجی نشان داد که سختی از ۱۶۳ ویکرز برای فلز پایه، تا ۳۶۵ ویکرز برای فلز جوش نزدیک به سطح افزایش یافته است.

۵- مراجع

- [1] Valsecchi B., Previtali B., Gariboldi E. and Liu A., Characterisation of the Thermal Damage in a Martensitic Steel Substrate Consequent to Laser Cladding Process. *Procedia Engineering*, Vol. 10, pp. 2851–2856, 2011.
- [2] Hoche D. and Schaaf P., Laser nitriding: Investigations on the Model System TiN. A review. *Heat Mass Transfer*, Vol. 47, No. 5, pp. 519–540, 2011.
- [3] P. Schaaf, Laser nitriding of metals, *Progress in Materials Science*, Vol. 47, No. 1, pp. 1–161, 2002.
- [4] Sha C. K. and Tsai H. L., Hardfacing Characteristics of S42000 Stainless Steel Powder with Added Silicon Nitride Using a CO₂ Laser. *Materials Characterization*, Vol. 52, No. 4–5, pp. 341–348, 2004.
- [5] Wang X. H., Microstructure and Properties of the TiC/Fe-Based Alloy Hardfacing Layers. *Journal of Materials Science*, Vol. 40, No. 14, pp. 3629–3633, 2005.
- [6] *ASM Metals Handbook, Vol. 6, Welding, Brazing, and Soldering*, ASM International.
- [7] Rao N. V., Reddy G. M. and Nagarjuna S., Weld Overlay Cladding of High Strength Low Alloy Steel with Austenitic Stainless Steel – Structure and Properties. *Materials and Design*, Vol. 32, No. 4, pp. 2496–2506, 2011.
- [8] Aloraier S. and Joshi S., Residual Stresses in Flux Cored Arc Welding Process in Bead-On-Plate Specimens. *Materials Science and Engineering A*, Vol. 534, pp. 13–21, 2012.
- [9] Mohamat S. A., Ibrahim I. A., Amir A. and Ghalib A., The Effect of Flux Core Arc Welding (FCAW) Processes on

