Archive of SID

بهبود متالورژیکی جوش ترمیت ریل با بهره‌گیری از وانادیم به منظور افزایش مقاومت به سایش

امین اوحدی اصفهانی، استادیار، دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
شهرام خیراندیش، دانشیار، دانشکده مهندسی مواد و متالوژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
E-mail:aowhadi@iust.ac

چکیده

وانادیم یکی از گزینه‌های مورد نظر برای بهبود خواص مکانیکی و ریزساختار فولادهاست. به همین جهت در این تحقیق تأثیر وانادیم بر ریزساختار و خواص مکانیکی جوش ترمیت فولادی که در درز ریل‌های راه‌آهن استفاده می‌شود، بررسی شده است. به این منظور مقادیر مختلف پودر فرو وانادیم به پودر جوشکاری اضافه شد و جوشکاری ترمیت روی ریل UIC60 انجام پذیرفت. نتایج حاصل نشان می‌دهد که با افزایش تدریجی وانادیم، نخست استحکام کششی، مقاومت در برابر سایش و میزان سختی افزایش می‌یابند، اما در مقادیر بالاتر وانادیم خواص کششی و مقاومت به ضربه فولاد پس از عبور از یک بیشینه، کاهش می‌یابند. بنابراین با افزودن وانادیم در دامنه ۰/۱ الی ۰/۱۵ درصد می‌توان سختی و مقاومت به سایش ریل را در عین حفظ خواص کششی و ضربه‌ای، بهبود بخشید.

واژه‌های کلیدی: جوش ترمیت، وانادیم، ریزساختار، خواص مکانیکی، ریل، سایش

۱. مقدمه

امروزه جوشکاری ترمیت یکی از مرسوم‌ترین روش‌های جوشکاری برای اتصال ریل‌های راه‌آهن به شمار می‌آید. این نوع جوش توسط واکنش شیمیایی بین اکسید آهن و آلومینیم و احیا شدن آهن توسط آلومینیوم و آزادشدن گرمای ناشی از فرایند اکسیداسیون آلومینیم صورت می‌گیرد. این واکنش اولین بار توسط واتین کشف شد و سپس برای اولین بار درسال ۱۸۹٤ توسط دکتر گلد اشمیت جهت اتصال دو قطعه آهنی به کار گرفته شد [۱].

زمانی که واکنش ترمیت انجام می‌گیرد، اکسید آهن احیا شده و آلومینیم اکسید می‌شود. آنگاه گرمای آزاد شده حاصل از این فرایند باعث افزایش دمای محصولات می‌شود. به علت تفاوت بین دانسیته آهن مذاب و اکسید آلومینیم جامد، آهن مذاب در زیر بوته و اکسید آلومینیم در روی سطح قرار می‌گیرد. می‌توان از این مذاب جمع شده، برای انجام عملیات جوشکاری استفاده کرد. از آنجا که محصول واکنش، آهن خام است و استحکام لازمه را برای اتصال ریل‌های راه‌آهن ندارد، برای افزایش خواص مکانیکی به آن عناصر آلیاژی نظیر کربن، سیلیسیم، منگنز و وانادیم اضافه می‌کنند.

در مطالعاتی که تاکنون روی تأثیر وانادیم بر فولادها و به‌ویژه فولادهای میکروآلیاژی با کربن متوسط انجام شده است، تأثیر این عنصر با توجه به مقدار آن را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد:

الف. ریزدانه کردن ساختار فولاد

ب. ایجاد رسوبات ریز کاربیدی که منجر به افزایش سختی و استحکام فولاد می‌شود.

پ. ایجاد کاربیدی‌های یوتکتیک که علیرغم افزایش سختی، موجبات کاهش انعطاف‌پذیری فولاد را فراهم می‌سازند. [٦،٢]

ت. افزایش خاصیت پرلیت‌زایی در مقادیر کم وانادیم

ث. افزایش ظرافت ساختار پرلیتی[۷،۳]

ج. تغییر در شکل و میزان فریت در ساختار فولاد[۸]

*تاریخ دریافت: ۸٦/۷/۲۵ - تاریخ پذیرش: ۸۷/۵/۱۱

www.SID.ir

Archive of SID

در یکی از آزمایش‌هایی که اثر وانادیم بر جوش ترمیت ریل را بررسی می‌کند، با قراردادن فرو وانادیم درانتهای خروجی بوته ترمیت، توانستند با استفاده از عوامل متالورژیکی فوق الذکر، سختی تاج جوش را به میزان ۱۵۰ برینل افزایش دهند. [۹، ۱۰]. این امر از آنجا اهمیت می‌یابد که تاج ریل در اثر تماس با چرخ‌ها در طول زمان سائیده می‌شود و بنابراین با افزایش سختی تاج ریل می‌توان با این پدیده سایش مقابله کرد. البته افزایش سختی تاج ریل تا آنجایی مطرح است که انعطاف‌پذیری و چقرمگی[1] تاج ریل بهبود یافته یا حداقل کاهش چندانی نداشته باشد.

۲. روش آزمایش

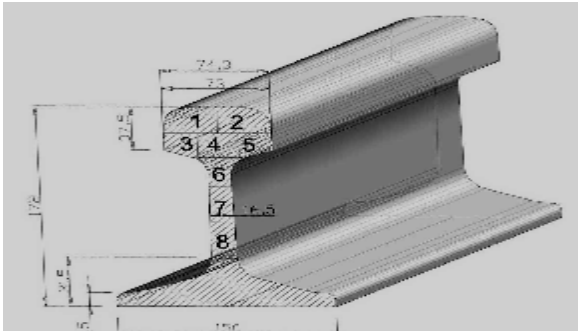
در این تحقیق از ریل‌های UIC60 برابر با استاندارد اروپایی و با آنالیز نشان داده شده در جدول ۱ جهت جوشکاری استفاده شد. ابتدا سر هر ریل به طول ۱۲ متر، توسط مشعل جوشکاری بریده و سطح آنها توسط سنگ صاف شد تا پوسته‌های اکسیدی از سطح مقطع زدوده شوند. سپس ریل‌ها در فاصله ۲۲ میلی متری از یکدیگر قرار داده شدند و در ادامه در راستای افقی و عمودی تراز گردیدند. دو نیمه قالب R60 (مطابق استاندارد اروپایی) در اطراف ریل‌ها محکم شده و پس از درزبندی، قسمت‌های راهگاه و سرباره‌گیر روی قالب نصب شد. به دنبال این مرحله، با قرار دادن مشعل در میان حفره درون قالب و طی زمانی در حدود ۱۵ دقیقه، دمای دو سر ریل به حدود $900^{\circ}C$ رسانیده شد. در ادامه پودر فروواندیم با مقدار ۹ کیلوگرم پودر ترمیت در داخل بوته، آتش زده شد و پس از گذشت زمانی در حدود ۲۵ ثانیه مذاب آماده شده به درون قالب سرازیر گشت و بوته کنار گذاشته شد.

پس از ٦ دقیقه، اضافه مذاب منجمد شده بر روی سر ریل‌ها که در حالت خمیری است، توسط گیوتین قطع شد. جوش‌ها به مدت ۱ ساعت به حال خود رها شده تا دمای آنها پایین بیاید و نهایتاً قالب از محل جوشکاری کنارزده شد. قسمت جوشکاری شده به فاصله ۲۵ سانتیمتر از محل جوش توسط مشعل از بقیه ریل قطع شد. از هر جوش ۳ نمونه ضربه، ۳ عدد کشش، ۲ نمونه کوانتومتری، ۲ نمونه متالوگرافی و ۱ نمونه جهت بررسی رفتار سایشی جوش مطابق شکل ۱ تهیه شد.

برای متالوگرافی، کلیه نمونه‌ها با استفاده از سنباده‌های دستی تا مش ۱۲۰۰ ساییده شدند و سپس با پودر کوراندوم ۱۵۰۰ مش پولیش شدند. محلول اچ بکار رفته نایتال۲/۵٪ بود. برای اندازه‌گیری درصد فازها از تجهیزات آنالیز تصویری[2] استفاده شد.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی ریل UIC60

درصد ازدیاد طول	استحکام تسلیم (مگاپاسکال)	ترکیب شیمیایی						نوع
		گوگرد٪	فسفر٪	کروم٪	سیلیسیم٪	منگنز٪	کربن٪	
≤ ۱۰	۸۸۰–۱۰۳۰	۰/۰٤	۰/۰٤	–	۰,۱–۰,۵	۰,۸–۱,۳	۰,٦–۰,۸	درجه ۹۰۰



شکل ۱. الگوی برش نمونه های آزمایشی از قسمت جوشکاری شده ریل؛ نمونه های ۱ و ۲ برای متالوگرافی و سختی سنجی، ۳و٤و ۵ برای آزمایش کشش، ٦و۷و۸ برای آزمایش ضربه.

www.SID.ir

Archive of SID

آزمایش سختی سنجی با روش ویکرز، با استفاده از بار ۱۰kg انجام گرفت. آزمایش کشش با استفاده از دستگاه یونیورسال و بررسی نمونه‌هایی به ابعاد طول گیج ۵۰mm و قطر ۱۰mm برابر با استاندارد DIN50125 انجام گرفت. آزمایش ضربه روی نمونه‌هایی به ابعاد حدود $10\times10\times55$ میلیمتر طبق استاندارد ASTM E23 A انجام شد. آزمایش سایش به روش پین روی دیسک با استفاده از دیسکی با ترکیب شیمیایی نزدیک به ترکیب شیمیایی ریل و سختی مشابه، و پینی با ابعاد $8\times8\times40$ میلیمتر برابر با استاندارد ASTM G83 با اندازه‌گیری کاهش وزن نمونه‌ها پس از انجام آزمایش سایش و با استفاده از ترازویی با دقت ۰/۰۰۰۱ gr انجام شد.

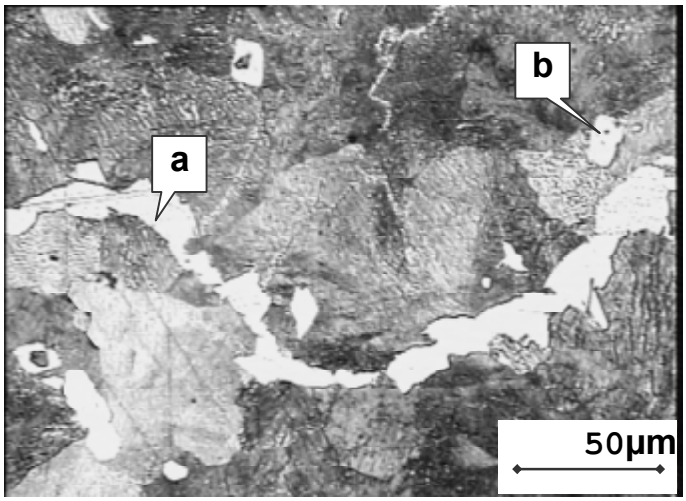
۳. نتایج و بحث

۳-۱ بررسی ساختار میکروسکوپی

جدول ۲، ترکیب شیمیایی جوش‌های مختلف انجام شده در این تحقیق را نشان می‌دهد. از آنجا که ترکیب فولاد منطقه جوش، در منطقه هیپویوتکتوئید قرار دارد، بنابراین ساختار فولاد تشکیل‌شده در منطقه جوش از نوع هیپویوتکتوئید است. این ساختار حاوی فریت‌های پرویوتکتوئید است که عمدتاً درمرز دانه‌های آستنیت و مقداری در داخل دانه‌ها و نزدیک مرزدانه‌ها به صورت فریت‌های مستقل وبلوکی تشکیل می‌شوند. ساختار جوش در نمونه شماره ۱ که وانادیم ازخارج به آن افزوده نشده است، حاوی زمینه پرلیتی، فریت مرزدانه‌ای و فریت بلوکی یا چندوجهی است که در شکل ۲ مشاهده می‌شود.

جدول ۲. آنالیز به‌دست آمده از نمونه‌های جوش توسط دستگاه کوانتومتری

نمونه	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Al	W	V
۱	پایه	۰/۵۲	۰/۲٤	۰/۸۷	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۸	۰/۰۵	۰/۰۹	۰/۰۱	۰/۰۳
۲	پایه	۰/٦۸	۰/۷۰	۰/۷٤	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰٦	۰/۰٤	۰/۰۸	---	۰/۰۹
۳	پایه	۰/۵۹	۰/۷۱	۰/۷۱	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰٦	۰/۰٤	۰/۰۸	---	۰/۱۱
٤	پایه	۰/۵۱	۰/۰۸	۰/۳۸	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۰٤	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۱٤
۵	پایه	۰/٦٦	۰/۵۲	۰/٦٦	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۱۱	۰/۰٤	۰/۰۸	---	۰/۲۱
٦	پایه	۰/٦٤	۰/۵۳	۰/۷۰	۰/۰٤	۰/۰۲	۰/۱۱	۰/۰۵	۰/۰٤	۰/۰۲	۰/۳٦



شکل ۲. ساختار جوش ترمیت در نمونه شماره یک، a- فریت مرزدانه‌ای b- فریت چند وجهی

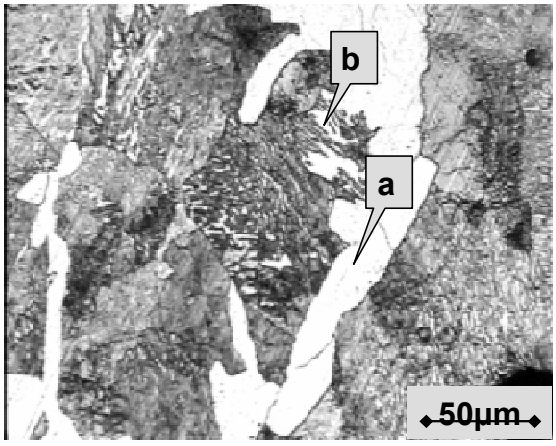
www.SID.ir

Archive of SID

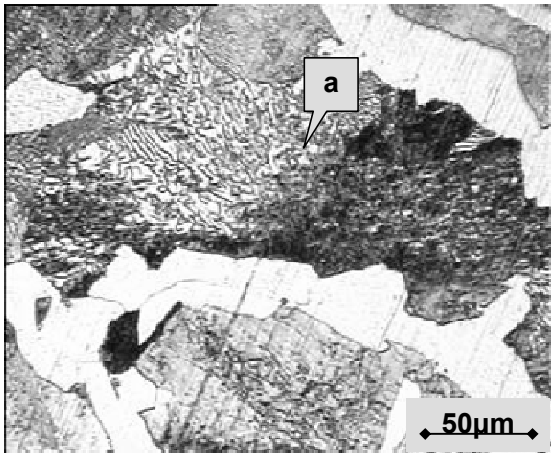
تغییرات ساختار منطقهٔ جوش با افزایش وانادیم، در شکل ۳ نشان داده شده است. در شکل ٤ نیز تغییرات میزان درصد فریت ریز ساختار بر حسب درصد وزنی وانادیم موجود در فلز جوش نشان داده شده است.

همان طور که در شکل‌های ۳و ٤ مشاهده می‌شود، با افزودن وانادیم به منطقه جوش، میزان فریت پرویوتکتوئید در ساختار افزایش می‌یابد. در این شرایط نیز فریت تشکیل شده، به دو شکل در ریزساختار ظاهر می‌شود. در نوع اول، فاز روشن یک دستی را در اطراف مرزدانه‌ها به وجود می‌آورد، و در نوع دوم به صورت ذرات کوچک چند وجهی در اطراف مرزدانه‌ها دیده می‌شود.

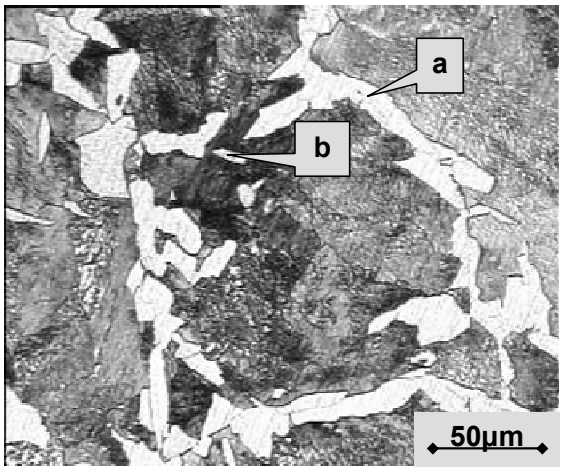
ولی با افزایش میزان وانادیم، میل به تشکیل فریت‌های مستقل در اطراف مرزها بیشتر می‌شود. همچنین با افزایش میزان وانادیم، ساختار فریت تشکیل یافته، از حالت بلوکی به سوی فریت‌های سوزنی و کشیده شده تغییر می‌یابد. به عبارت دیگر وانادیم، از تشکیل فریت‌های چندوجهی جلوگیری کرده، شرایط را برای جوانه زنی فریت‌های سوزنی مهیا می‌سازد [۱۱]. با افزودن بیشتر وانادیم، در انتهای انجماد، به دلیل جدایش و پس زده شدن عناصر کربن و وانادیم، مقداری یوتکتیک کاربید وانادیم و آستینت تشکیل می‌شود که نمونه‌ای از این ساختار یوتکتیک در شکل ۳- ب دیده می‌شود.



الف)a - فریت پرویوتکتوئید تشکیل یافته در مرز دانه‌ها،
b – فریت‌های مستقل در اطراف مرز دانه



ب) a- لایه‌های کاربید یوتکتیک حاصل از حضور وانادیم

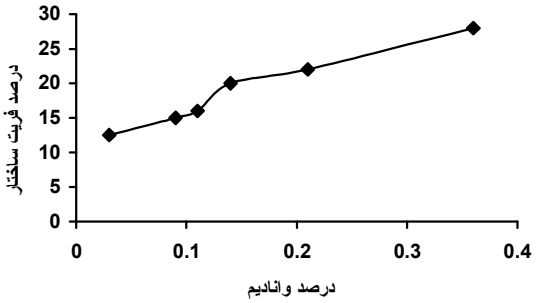


پ) a- فریت تشکیل یافته در مرز دانه، b- فریت مستقل کوچک در اطراف مرز

شکل ۳. ساختار منطقه جوش در نمونه‌های الف- ٪۰/۱٤= V ب- ٪۰/۲۱=v ، ب-٪۰/۳٦= V

www.SID.ir

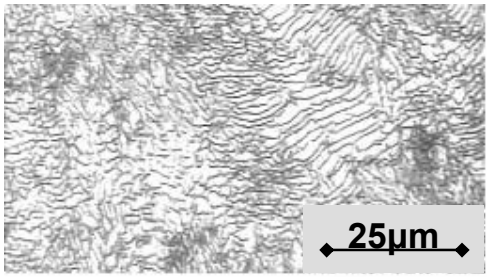
Archive of SID



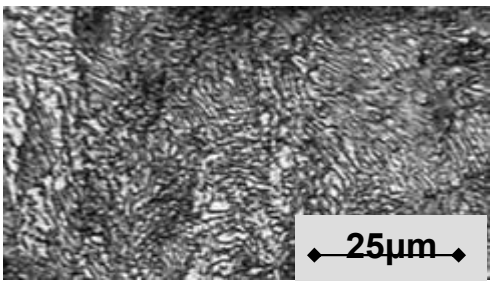
شکل ٤. درصد فریت ریزساختار برحسب درصد وزنی وانادیم در فلز جوش

بنابراین، دلیل افزایش میزان فریت در اثر افزودن وانادیم را می‌توان به این صورت توجیه کرد که با افزایش وانادیم، میزان کاربیدهای وانادیم تشکیل شده در حین انجماد افزایش می‌یابد که در نتیجه این عمل، قاعدتاً میزان کربن زمینه و ترکیب شیمیایی فولاد به سمت ترکیب شیمیایی فولادهای هیپویوتکتوئید با درصدهای پایین‌تر کربن پیش‌رفته،و بنابراین در استحاله‌های بعد از انجماد، فریت بیشتری در زمینه فلز جوش تشکیل می‌شود.

با افزایش وانادیم، ظرافت ساختار پرلیت افزایش می‌یابد. ظرافت بیشتر لایه‌ها به معنی فشرده شدن ساختار پرلیت و تیره‌تر شدن این ساختار در تصاویر میکروسکوپی است. شکل ٥، تأثیر افزودن وانادیم بر ظرافت ساختار پرلیتی را نشان می‌دهد.



الف)



ب)

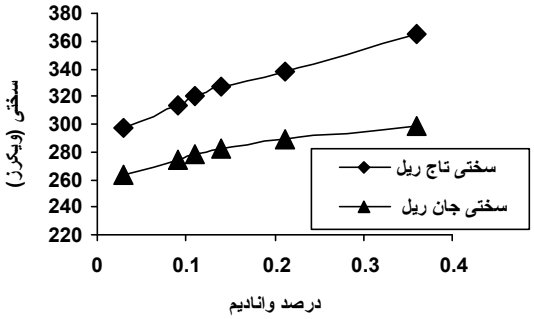
شکل ٥. ساختار پرلیت در نمونه‌ای با الف- V =۰/۰۳، ب- V =۰/۳٦

۳-۲ خواص مکانیکی

۳-۲-۱ سختی

مطابق شکل ٦، مشاهده می‌شود که میزان سختی جوش درتاج و جان ریل با افزایش وانادیم افزایش می‌یابد، به گونه‌ای که با افزایش ۰/۳۵ درصد وانادیم، سختی در تاج ریل، حدود ٦٥ ویکرز و در جان ریل، حدود ۳٥ ویکرز افزایش می‌یابد.

ضخامت ریل در تاج، بیشتر از ضخامت جان ریل است، و قاعدتاً می‌بایستی سختی تاج ریل، کمتر باشد، اما به دلیل ضخامت بیشتر لایه دیرگداز (قالب) به هنگام جوشکاری در اطراف جان ریل، و از طرفی تماس قسمت تاج ریل با هوا و سرعت بیشتر سرد شدن این منطقه، سختی‌های بالاتری به دست آمده است.



شکل ٦. مقایسه بین سختی تاج و جان ریل در محل جوش برحسب وانادیم موجود در فلز جوش

براساس شکل ٤، با افزایش مقدار وانادیم، درصد فریت ساختار جوش افزایش می‌یابد و قاعدتاً می‌بایستی، سختی جوش کاهش یابد، امّا موارد ذیل، با کاهش سختی مقابله کرده، به افزایش آن در منطقه جوش منجر می‌شود:

۱- با افزایش وانادیم به دلیل تمایل زیاد وانادیم به تشکیل کاربید [٤،٥] میزان کاربید وانادیم و شبکه‌های یوتکتیکی آن افزایش می‌یابد.

۲- با افزایش وانادیم، نوع فریت موجود در مرزدانه‌ها، از حالت بلوکی به سوی فریت‌های سوزنی و کشیده شده تغییر می‌یابد که خود باعث افزایش سختی و استحکام خواهد شد.

۳- با افزایش وانادیم، ظرافت ساختار پرلیت افزایش می‌یابد که خود در افزایش سختی و استحکام مؤثر است.

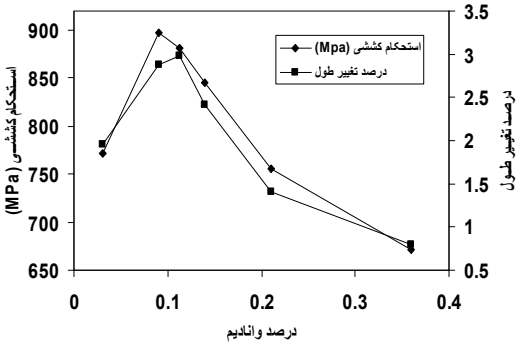
www.SID.ir

Archive of SID

۳-۲-۲ خواص کششی

تغییرات خواص کششی نمونه‌ها برحسب درصد وانادیم در شکل ۷ مشاهده می‌شود. با افزایش وانادیم جوش، به تدریج فریت‌های بلوکی در مرزدانه‌ها به فریت‌های سوزنی تبدیل می‌شوند که از لحاظ استحکام وضعیت بهتری نسبت به فریت‌های بلوکی دارند. قاعدتاً با افزایش فریت در مرزدانه‌ها، می‌بایستی درصد تغییر طول نیز افزایش یابد، اما همین تغییر تدریجی مورفولوژی فریت در مرزدانه‌ها، از عوامل مؤثر در کاهش درصد تغییر طول در بعد از ۰/۱۱ درصد وانادیم است. البته کاربید وانادیم و شبکه‌های یوتکتیک آن نیز باعث ترد شدن فولاد و کاهش درصد تغییر طول می‌شود.

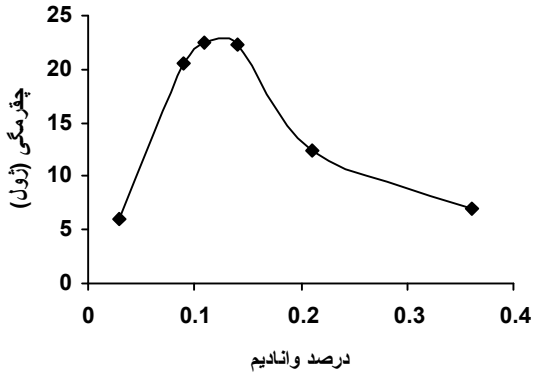
تأثیر وانادیم در افزایش میزان فریت موجود در ساختار جوش (شکل ٤) و قاعدتاً کاهش پرلیتِ ساختار به قدری است که حتی بر عوامل افزایش استحکام، غلبه یافته، به کاهش استحکام کشش جوش در بعد از ۰/۰۹ درصد وانادیم منجر می‌شود.



شکل ۷. خواص کششی جوش برحسب میزان وانادیم در فلز جوش

۳-۲-۳ خواص ضربه‌ای

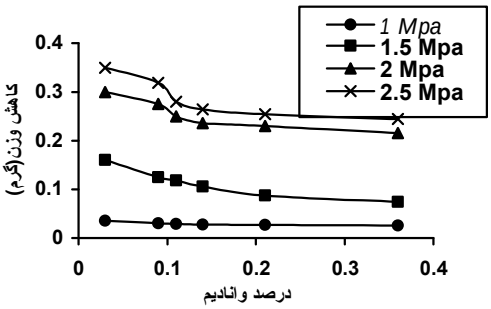
همان طور که در نمودار شکل ۸ مشاهده می‌شود، افزایش وانادیم تا ۰/۱٤ درصد، مقاومت به ضربه را افزایش می‌دهد. اصولاً کاهش پرلیت و افزایش فریت، باعث افزایش چقرمگی می‌شود. همچنین رشد فریت سوزنی به جای فریت بلوکی نیز به افزایش چقرمگی کمک می‌کند، زیرا تَرک برای آن که بتواند از این ساختار عبورکند، مجبور به تغییر مسیر می‌شود و لزوماً انرژی مصرف شده افزایش یافته و چقرمگی بیشتر می‌شود [۱۲]. امّا با ادامه افزایش وانادیم، به دلیل تشکیل شبکه‌های یوتکتیک کاربید وانادیم که تردی ذاتی دارند، چقرمگی کاهش می‌یابد، زیرا رشد ترک در لایه‌های ساختار کاربیدی به راحتی امکان‌پذیر است.



شکل ۸ استحکام ضربه شارپی جوش بر حسب وانادیم موجود در فلز جوش

۳-۲-٤ سایش

با دیدن شکل ۹ که نتایج آزمایش سایش را نشان می‌دهد، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش وانادیم جوش، در تمامی شرایط، مقاومت به سایش افزایش می‌یابد. به نظر می‌رسد که افزایش سختی بر افزایش مقاومت به سایش حاکم است و بنابراین همان عوامل مؤثر بر افزایش سختی، در تحلیل سایش نیز دخالت دارند.



شکل ۹. میزان کاهش وزن پین در آزمایش سایش برحسب میزان وانادیم موجود در فلز جوش در ٤ فشار مختلف

٤. نتیجه‌گیری

با افزایش مقدار وانادیم در فلز جوش ترمیت درز ریل‌های راه‌آهن، نتایج زیر حاصل شدند:

۱- مقدار فریت، افزایش یافته، میزان پرلیت کاهش می‌یابد.

۲- فریت‌های بلوکی به فریت‌های سوزنی تبدیل می‌شوند.

۳- سختی و مقاومت به سایش نقاط مختلف جوش افزایش می‌یابد.

٤- تا ۰/۱٤ درصد وانادیم، چقرمگی جوش ترمیت افزایش می‌یابد، اما در ادامه با افزایش وانادیم، چقرمگی کاهش می‌یابد.

www.SID.ir

Archive of SID

۵- با افـزایش وانـادیم تـا ۰/۱ درصـد، خـواص کشـشی یعنـی استحکام کششی و درصد ازدیاد طول افزایش مـی یابنـد، امّـا بـا افزایش بیشتر وانادیم، این خواص کاهش می‌یابند.

٦- با افزودن وانادیم در دامنه ۰/۱ الـی ۰/۱۵ درصـد، مـی‌تـوان سختی و مقاومت به سایش ریل را درعین حفظ خواص کشـشی و ضربه‌ای، بهبود بخشید.

۵. سپاسگزاری

از مدیریت اداره کل مهندسـی و بازرسـی خـط راه‌آهـن و کلیـه کارکنان محترم آن اداره که ما را در انجام این پروژه یاری کردند، سپاسگزاری می‌شود.

٦. مراجع

1. Metals Handbook (1983) "Thermit welding", ASM, 10Ed, Vol.6, pp.692-704.

2. Edmonds, D. V. (1996) "Precipitation in micro alloyed higher carbon steels", Fundamentals and applications of micro alloying forging steels,TMS,1996, pp.111-125.

3. Lagneborg, R. Siwecki, T. S. Ajac, S. and Hutchinson, B. (1999) "The role of vanadium in microalloyed steels", Scandanavian Journal of Metallurgy, 28, pp. 186–241.

4. Shen, C. D. (1986) "Research of raising the toughness of rail joints using thermit welding", Proceedings of the International Conference Joining of Metals, December. Ingeniorhojskolen Helsinger Teknikum , Denmark, pp.246-250.

5- Garcia, C. Romero, J. L. and Rudriguez-Ibabe, J. M. (1998) "Warm forging of vanadium microalloyed steel", Microalloying in Steels, Trans Tech Publications, pp.427-434.

6- Ajac, S., Siwecki, T., Hutchinson, W. B. and Lagneborg, R. (1998) " The role of carbon in enhancing precipitation strengthening of V-microalloyed steels", Microalloying in Steels, Trans Tech Publications, 1998, pp.295-302.

7- Kuster, F. (1996)" Method for intermediate cast type welding of finely pearlitized rails", US patent-5531259.

8- Mulder, G. (2000) "Process for the aluminothermic welding of rails with alloying of the weld metal in the rail head region", CA patent-2214054.

9. Kulse, M. (1998) "Aluminothermic mixture", CA patent-2222840.

10. Moller, R. , Mutton, R. , Steinhorst, P. M. (2001) "Improving the performance of aluminothermic rail welding technology, through selective alloying of the rail head", Proc. 7th International Heavy Haul Conference, Brisbane, IHHA, pp.331–338.

11. Basu, B.(2002) "Microstructure variation in a high-strength structural steel weld under isoheat input conditions", Welding Journal, November, pp.239-248.

12- Doltse, R. (1967) "Residual stresses in alumino-thermally welded rails", Schwelssen, U. Schneiden, Vol. 12, No.10, pp. 471-476

www.SID.ir