

بهینه سازی پارامترهای مؤثر بر جوشکاری ورق های فولادی
کم کربن و کم سیلیسیم مورد استفاده در ساخت وان گالوانیزه گرم*

حسن غیائی^(۱) مسعود مصلائی پور یزدی^(۲) علی اصغر نجف زاده^(۳) محمد فرخ^(۴) امیرحسین کوکبی^(۵) محمد قربانی^(۶)

چکیده

X X

Nilsil

واژه های کلیدی

Optimization of Effective Parameters in Welding of Low Carbon & Low Silicon
Steel Plates in Hot-Dip Galvanizing Kettle

H. Ghiasi M. Mosallaiee pour A. Nagafzadeh M. Farrokh A.H. Kokabi M. Ghorbani

Abstract

Galvanizing kettle is one of the main components of hot dip galvanizing process. Welding is the final stage in galvanizing kettle fabrication. In the present research the effect of various welding parameters such as bevel pattern and chemical composition of filler metal on mechanical properties, microstructure and corrosion resistance of welded galvanized steel were investigated. Results showed that symmetry bevel pattern is more effective than the non-symmetry one in developing desired properties in welding zone. Although both patterns developed acceptable mechanical properties in welded coupons. NDT results confirmed that welding zone is free from defects such as porosity, inclusion trapping, lack of penetration and etc. Various tests on the electrode type showed Nilsil electrode is more effective than AMA 1531 and 2000 electrodes in producing sound joints. Corrosion tests showed that silicon is the most detrimental element on corrosion resistance of welded coupons.

Key Words Welding, Hot-Dip Galvanizing kettle, Bevel Pattern, Corrosion, Low Silicon Electrode.

* نسخه نخست مقاله در تاریخ ۸۷/۴/۱۵ و نسخه پایانی آن در تاریخ ۸۸/۴/۲۷ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) عضو هیأت علمی پژوهشگاه توسعه تکنولوژی

(۲) دانشجوی دکتری، دانشگاه صنعتی شریف

(۳) دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات

(۴) عضو هیأت علمی پژوهشگاه توسعه تکنولوژی

(۵) استاد دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف

(۶) استاد دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف

لایه دلتا، ۲۴۴DPN، لایه زتا، ۱۷۹DPN و لایه اتا، ۷۰DPN است. به عبارتی سه لایه اول سخت‌تر از فولاد بوده و لایه آخر دارای انعطاف‌پذیری بالاست. ترکیب سختی، انعطاف‌پذیری و چسبندگی بالای این پوشش‌ها از آنها محافظی با خواص بسیار خوب می‌سازد. عوامل مختلفی بر تشکیل هر یک از لایه‌های آلیاژی فوق و ضخامت و ظاهر آنها مؤثر است که عبارتند از: ترکیب شیمیایی فولاد پایه، شرایط سطحی فولاد، انجام کار سرد بر روی فولاد قبل از گالوانیزه، دمای حمام مذاب روی، زمان تماس مذاب با فولاد و سرعت بیرون کشیدن و سردشدن فولاد (درهنگام گالوانیزه قطعات فولادی) [6].

از مهمترین عوامل مؤثر بر خوردگی وان گالوانیزه می‌توان به دمای فصل مشترک دیواره وان با مذاب داخل وان و ترکیب شیمیایی مذاب اشاره نمود. در شکل (۲) تأثیر دمای فصل مشترک دیواره و مذاب روی داخل وان بر سرعت خوردگی دیواره وان ارائه شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود سرعت واکنش یاد شده در محدوده دمای 520°C - 490°C به شدت افزایش می‌یابد [2].

حضور برخی عناصر آلیاژی مانند سیلیسیم، فسفر و غیره باعث توسعه محدوده تشدید خوردگی به 530°C - 480°C می‌شود [2,7]. میزان سیلیسیم و فسفر در فولاد شدیداً بر ضخامت و ظاهر پوشش گالوانیزه مؤثر است. این عناصر می‌توانند سبب ایجاد پوشش‌هایی ضخیم و ترد شوند. اثر مقدار سیلیسیم فولاد بر ضخامت پوشش و لایه آلیاژی تشکیل شده در شکل (۳) نشان داده شده است. عناصر کربن، گوگرد و منگنز تأثیر ناچیزی بر ضخامت پوشش گالوانیزه دارند. لکن مقادیر کربن کمتر از ۰/۲۵ درصد، فسفر کمتر از ۰/۰۴ درصد و یا منگنز کمتر از ۱/۳۵ درصد مفید است. فسفر در طی فرآیند گالوانیزه به عنوان یک کاتالیزور عمل نموده و باعث رشد سریع لایه‌های آلیاژی آهن- روی می‌شود.

وان گالوانیزه یکی از مهمترین اجزای فرآیند گالوانیزه گرم می‌باشد. با توجه به وجود روی مذاب درون وان، به وجود آمدن هر گونه عیب و یا نقص قابل ملاحظه در وان می‌تواند منجر به بروز فاجعه انسانی و مالی فراوانی شود. مهمترین عوامل مؤثر بر طول عمر وان، نوع فولاد بکار رفته در ساخت بدنه وان، کیفیت طراحی و کیفیت جوشکاری مناطق مختلف آن می‌باشد [1]. از جمله علل اصلی از کار افتادگی وان می‌توان به تشکیل نقاط داغ و تشدید خوردگی بدنه وان در این نقاط اشاره نمود. دمای کاری بالا به همراه تنش‌های اعمالی به وان منجر به تشدید خوردگی، کاهش ضخامت دیواره و در نهایت باعث از کار افتادگی وان می‌شود [2]. دمای کاری وان‌های گالوانیزه صنعتی در حدود 450°C می‌باشد. توزیع غیر یکنواخت دما در بدنه وان می‌تواند منجر به تشکیل نقاط داغ موضعی در پیکره وان و در نتیجه تشدید خوردگی در بخش‌هایی از آن شود [3-5].

در گالوانیزه گرم، مذاب روی با فولاد زمینه واکنش داده و بسته به پارامترهای مختلف، لایه‌هایی از آلیاژ آهن- روی تشکیل می‌دهد. شکل (۱) نمونه‌ای از ریزساختار این لایه‌ها را نشان می‌دهد که عبارتند از:

لایه گاما (Γ) که لایه‌ای نازک با حدود ۲۵ درصد وزنی آهن و ساختار کریستالی BCC بوده و اولین لایه مجاور به فولاد پایه است.

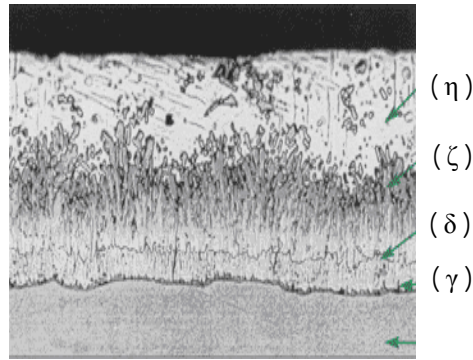
لایه دلتا (δ) با حدود ۱۰ درصد وزنی آهن و ساختار کریستالی هگزاگونال، اولین لایه مجاور به لایه Γ است.

لایه زتا (ζ) با حدود ۶ درصد وزنی آهن و ساختار کریستالی منو کلینیک که مجاور به لایه دلتاست و در بالای 490°C پایداری خود را از دست می‌دهد.

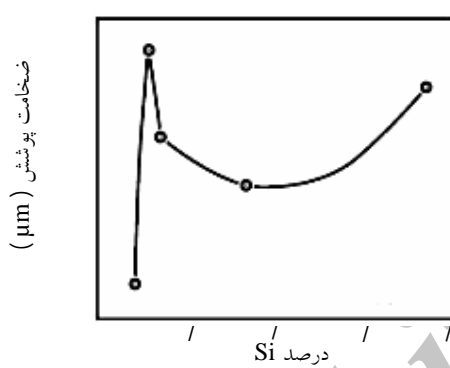
لایه اتا (η) که تقریباً روی خالص با ساختار HCP بوده و خارجی‌ترین لایه آلیاژی است.

در فولادی با سختی ۱۵۹ DPN (Diamond

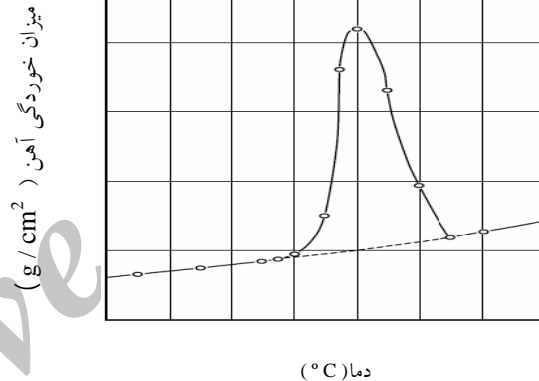
Pyramid Number)، سختی لایه گاما، ۲۵۰ DPN



شکل ۱ لایه‌های آلیاژی تشکیل شده در یک پوشش گالوانیزه گرم [6]



شکل ۳ تغییرات ضخامت لایه آلیاژی تشکیل شده بر دیواره داخلی وان برحسب میزان سیلیسیم [۱۰].



شکل ۲ تأثیر دما بر سرعت واکنش آهن با روی مذاب [2]

محدوده ۰/۲۵-۰/۱۵ درصدوزنی نیز حالتی مطلوب نسبت به بقیه درصدهاست [۹،۱۱]. از طرفی با توجه به اینکه واکنش روی با آهن یک فرآیند نفوذی است، دماهای بالاتر وان مذاب روی و زمان‌های تماس بیشتر آن با فولاد، لایه‌های آلیاژی ضخیم‌تری ایجاد می‌نماید. همانند تمام فرآیندهای نفوذی واکنش در آغاز به سرعت پیشرفت نموده و با رشد لایه‌ها و ضخیم‌تر شدن آنها، کند می‌شود. از طرفی تلاطم مذاب روی داخل وان هنگام فروربردن یا بیرون کشیدن قطعات از آن، و یا حتی گاهی بر خورد قطعات به دیواره وان و نیز، دمای بالا در برخی نقاط (نقاط داغ) باعث کنده

براساس شکل (۳) حضور سیلیسیم به میزان ۰/۰۵-۰/۱۱ درصد وزنی باعث رشد لایه آلیاژی تشکیل شده بر دیواره وان و افزایش ضخامت آن می‌شود. این محدوده از درصد سیلیسیم را محدوده سندلین (Sandeline Range) می‌گویند [8,11].

با توجه به شکل و بدون در نظر گرفتن مورفولوژی لایه‌های آلیاژی تشکیل شده، به منظور افزایش عمرکاری وان مطلوبترین حالت آن است که مقدار عنصر سیلیسیم در ترکیب شیمیایی فولاد به کار رفته در ساخت وان و همچنین مواضع جوشکاری شده آن کمتر از ۰/۰۵ درصد وزنی نگهداشته شود. البته

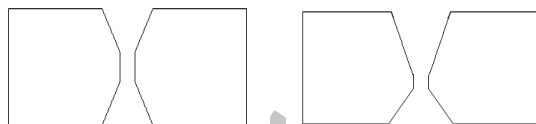
اقتصادی در این فولادها، مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است.

به منظور بررسی پارامترهای مورد نظر در این تحقیق، هشت ورق فولادی از جنس فولاد مورد استفاده در ساخت وان گالوانیزه با ابعاد $600 \times 150 \times 50$ mm و ترکیب شیمیایی ارائه شده در جدول (۱) مورد استفاده واقع شد.

به منظور تعیین تأثیر پخ بر خواص و کیفیت مواضع جوشکاری شده، شش ورق از فولاد مزبور توسط طرح پخ X متقارن و دو ورق توسط طرح پخ X نامتقارن آماده‌سازی شد (شکل ۴).

شدن یا حل شدن لایه‌های آلیاژی محافظ تشکیل شده بر سطح فولاد وان شده و آن را در معرض خوردگی و واکنش مجدد با روی مذاب قرار می‌دهد که باعث کاهش عمر وان می‌شود.

به طور کلی یک وان گالوانیزه همانقدر قابل اعتماد است که مواضع جوشکاری شده آن قابل اطمینان باشند. از این رو، لازم است ترکیب شیمیایی، ریزساختار، خواص مکانیکی و مقاومت به خوردگی مناطق جوشکاری شده مشابه و یا بهتر از خواص مشابه در فولاد وان باشد. با توجه به تولید موفقیت آمیز فولادهای مورد استفاده برای ساخت وان و خم‌کاری آنها در کشور و عدم دسترسی به اطلاعات فنی مربوط به جوشکاری این ورق‌ها، در تحقیق حاضر راهکارهای مهمی برای ایجاد اتصالی قابل اطمینان و



شکل ۴ شماتیک طرح پخ
الف) طرح پخ X متقارن (ب) طرح پخ X نامتقارن.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی فولاد مورد استفاده

S	P	Mn	Si	C	Fe
/	/	/	/	/	/

جدول ۲ مشخصات الکترودهای مورد استفاده و نمونه‌های جوشکاری شده با آنها

()									
			S	P	Mn	Si	C		
O	X	A			/	/	/		
B	X	B	</	</	/	/	/		
N	X	C	/	/	/	/	/	Metrode	Nilsil
	X	D							

ناخالصی، نفوذ ناقص دیواره و غیره در مناطق جوشکاری شده با الکترودها و طرح پخ‌های متفاوت توسط آزمایشات غیر مخرب امواج ماوراء صوت و مایع نافذ تأیید شد. نتایج حاصل از آزمایش کشش نمونه‌های جوشکاری شده و فولاد پایه در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول ۳ نتایج حاصل از آزمایش کشش بر روی فولاد پایه و نمونه‌های جوشکاری شده

	MPa	MPa	
			A
			B
			C
			D
---			E

از نتایج جدول فوق با توجه به موضع شکست نمونه‌های جوشکاری شده با الکترودها و طرح پخ‌های مختلف و در نظر گرفتن خواص کششی فولاد پایه نتیجه می‌گیریم که نمونه‌های جوشکاری شده دارای خواص مکانیکی مطلوبی می‌باشند. خواص کششی کمی بالاتر نمونه جوشکاری شده با طرح پخ X متقارن (نمونه D) نسبت به طرح پخ X نامتقارن (نمونه C) می‌تواند به دلیل حذف و یا کاهش تنش‌های پسماند در حین جوشکاری طرفین طرح پخ متقارن باشد. در این شرایط احتمال پیچیدگی ناشی از جوشکاری نیز کاهش می‌یابد. یکی دیگر از دلایل ترجیح پخ X متقارن نسبت به نامتقارن جنبه اقتصادی آن است. چنانکه در هر یک از طرح‌های پخ فوق‌الذکر جهت کاهش هزینه‌ها فقط می‌توان طرف در تماس با مذاب را با الکتروده کم سیلیسیم جوش داده و طرف دیگر را با الکتروده معمولی جوشکاری نمود. از این جهت در طرح پخ نامتقارن در صورتی که طرف با فاصله جوش کمتر با الکتروده کم سیلیسیم جوشکاری شود، به دلیل عمق جوش کمتر آن نسبت به طرح متقارن، دارای عمر کمتری در تماس با مذاب خواهد

ورق‌های آماده سازی شده دو به دو توسط فرآیند جوشکاری قوس با الکتروده دستی، جریان DC با پلاریته مثبت، ولتاژ OCV حداقل ۷۰V و ولتاژ جوشکاری ۲۷۷-۲۴ به یکدیگر جوش داده شدند. جوشکاری به صورت عمودی سربالا (3G) و حرکت زیگزآگی صورت پذیرفت. افزون بر این، برای جلوگیری از ایجاد پیچیدگی، جوشکاری متناوباً در طرفین ورق‌ها انجام شد. برای بررسی تأثیر ترکیب شیمیایی الکترودها بر خواص مواضع جوشکاری شده از سه نوع الکتروده با مشخصات ارائه شده در جدول (۲) استفاده گردید [13,14].

در این تحقیق فولاد پایه با حرف E نامگذاری شده است. تعیین کیفیت و خواص مکانیکی مواضع جوشکاری شده توسط آزمایش‌های غیر مخرب و مخرب و مطابق با استانداردهای ASME Sec IX و DIN EN 1043-1 صورت پذیرفت. مهمترین آزمایشات انجام شده بر روی نمونه‌های جوشکاری شده عبارت بودند از: امواج ماوراء صوت (UT)، مایع نفوذ کننده (PT)، آنالیز شیمیایی فلز جوش، بررسی ریز ساختاری و درشت ساختاری فلز جوش و مناطق اطراف آن و آزمایش‌های کشش، سختی سنجی و خمش [1]. به علت اهمیت زیاد مسئله خوردگی در مواضع جوشکاری شده، آزمایش خوردگی بر روی قطعات جوشکاری شده توسط الکترودهای مختلف نیز صورت پذیرفت. آزمایش خوردگی در مذاب روی با دمای $445 \pm 10^\circ\text{C}$ و در مدت زمان‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ شبانه روز در وان مذاب صنعتی انجام شد. برای بررسی میزان خوردگی در هر یک از نمونه‌ها، ابعاد و وزن نمونه‌ها قبل از ورود به وان مذاب و بعد از خروج از آن اندازه‌گیری شد. افزون بر این، ضخامت پوشش روی ایجاد شده بر روی نمونه‌ها بعد از خروج از وان به روش متالوگرافی و تعیین اختلاف وزن نمونه اولیه با نمونه پس از خروج از وان، اندازه‌گیری شد.

سلامت جوش و عدم حضور عیوبی از قبیل تخلخل،

محاسبه گردید. درصد عنصر سیلیسیم حاصل از جوش هر سه الکتروود در ناحیه نزدیک به HAZ و پاس ریشه به علت اثر رقت فلز پایه کمتر از مقدار آن در پاس‌های بعدی جوش است.

نتایج حاصل از سختی سنجی نمونه‌های مختلف توسط روش ویکرز در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵ نتایج آزمایش سختی‌سنجی نمونه‌ها (HV)

HAZ		
		A
		B
		C
		D

سرعت بالای سرد شدن وانجماد حوضچه جوش و ناحیه متأثر از حرارت جوش باعث ایجاد سختی بالاتر در این مناطق نسبت به سختی فلزپایه (HV ۱۱۰) می‌گردد. از نتایج جداول (۳ و ۵) تأثیر سیلیسیم بر خواص مکانیکی به خوبی قابل مشاهده است. همانگونه که می‌بینیم افزایش درصد سیلیسیم باعث افزایش استحکام نهایی و تسلیم و نیز سختی فولاد می‌شود.

بررسی‌های ماکروسکوپی انجام شده بر روی نمونه‌های جوشکاری شده، نتایج آزمایش‌های غیرمخرب در مورد عدم حضور تخلخل، ناخالصی، نفوذ ناقص و یا دیگر عیوب در مواضع جوش را تأیید می‌نماید، شکل (۵).

تصاویر ریزساختاری مناطق مختلف در نمونه‌های جوشکاری شده با الکتروود Nilsil شامل فلز جوش، منطقه متأثر از حرارت جوش و فلز پایه در شکل (۶) ارائه شده است. همانگونه که در این شکل دیده می‌شود ریزساختار فلزجوش یک ساختار ریختگی متشکل از فاز فریت و مقدار کمی پرلیت می‌باشد. ریز ساختار در نواحی متأثر از حرارت جوش و فلز پایه نیز شامل فریت به همراه مقداری پرلیت است که اندازه دانه‌های فریت در آنها به ترتیب حدود ۱۱

بود؛ چرا که مدت زمان لازم تا رسیدن به ریشه جوش (با فرض خورده شدن کامل یک طرف پخ) کمتر است. در صورتی که طرف با فاصله جوش بیشتر با این الکتروود جوش داده شود، هزینه آن نسبت به طرح متقارن افزایش می‌یابد. زیرا الکتروود مخصوص بیشتری مصرف می‌شود. لذا طرح متقارن از این جهت نیز نسبت به طرح نامتقارن برتری دارد.

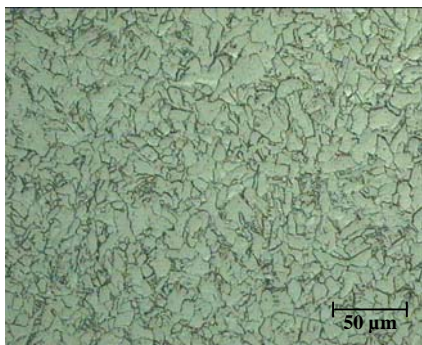
نتایج حاصل از آزمایش خمش جانبی (Side Bend) نمونه‌های مختلف نشان داد که نمونه‌های جوشکاری شده با الکتروودها و طرح پخ‌های مختلف از انعطاف‌پذیری قابل قبولی نیز برخوردارند. نتایج آزمایش کشش و خمش جانبی براساس معیارهای مشخص شده در استاندارد [14] ASME Sec IX، در محدوده مجاز و قابل قبول واقع است.

در جدول (۴) ترکیب شیمیایی فلزجوش حاصل از الکتروودهای مختلف اندازه‌گیری شده توسط روش اسپکترومتری، ارائه شده است.

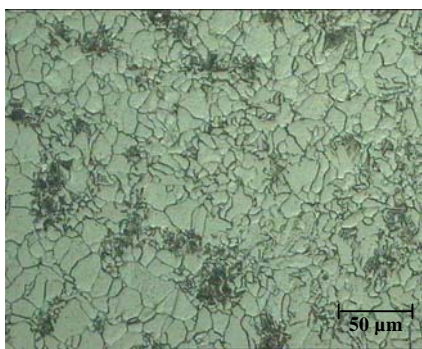
جدول ۴ ترکیب شیمیایی فلز جوش حاصل از الکتروودها

نوع الکتروود	ترکیب شیمیایی (درصد وزنی)				
	S	P	Mn	Si	C
آما ۲۰۰۰	۰/۰۱۲	۰/۰۱۷	۰/۵۶	۰/۳۸	۰/۰۷
آما ۱۵۳۱	۰/۰۱۳	۰/۰۲۲	۰/۵۸	۰/۲	۰/۰۷
Nilsil	۰/۰۰۷	۰/۰۱۷	۰/۴۳	۰/۰۶	۰/۰۹

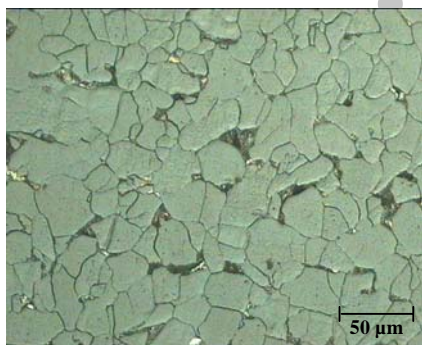
مقایسه ترکیب شیمیایی فلز جوش حاصل از الکتروودهای مختلف (جدول ۴) و فلزپایه (جدول ۱) نشان می‌دهد که الکتروود Nilsil مطلوبترین الکتروود برای ایجاد فلز جوشی نزدیک به ترکیب شیمیایی فلز پایه به ویژه در مقدار سیلیسیم که عنصر حساس در خوردگی است، می‌باشد. با توجه به میزان مشارکت فلزپایه در ترکیب شیمیایی فلزجوش، درجه رقت الکتروود Nilsil حدود ۳۵ درصد و الکتروودهای آما ۲۰۰۰ و آما ۱۵۳۱، به ترتیب، مقادیر ۴۰ و ۳۸/۵ درصد



الف



ب



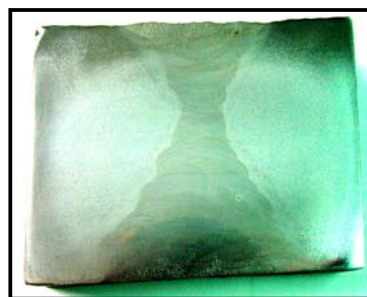
ج

شکل ۶ ریزساختار نمونه‌های جوشکاری شده با الکتروود Nilsil و طرح پنخ متقارن (الف) فلزجوش (ب) منطقه HAZ (ج) فلز پایه.

کمترین و بیشترین میزان کاهش وزن ناشی از خوردگی به ترتیب مربوط به کمترین و بیشترین میزان سیلیسیم فلزجوش نمونه‌های جوشکاری شده با الکترودهای مزبور است. مقادیر بیشتر سیلیسیم در فلز جوش ایجاد شده توسط الکتروود آما ۲۰۰۰ باعث

ASTM (قطر متوسط ۷/۹ میکرومتر) و ۶-۷ ASTM (قطر متوسط ۳۱/۸-۴۴/۹ میکرومتر) است. لازم به ذکر است که تغییر نوع الکتروود مصرفی و طرح پنخ باعث تغییر اندکی در ریزساختار موضع اتصال می‌شود که می‌تواند ناشی از شرایط جوشکاری باشد. افزون بر این، ریز ساختار در پاس‌های مختلف نیز ممکن است به صورت ریز دانه، درشت دانه یا ستونی باشد.

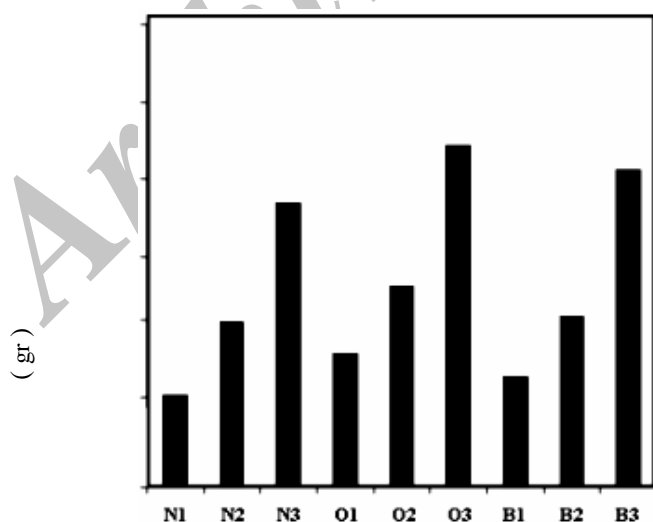
نتایج حاصل از آزمایش خوردگی نمونه‌های جوشکاری شده با الکترودهای مختلف در شکل (۷) این شکل و شکل (۸)، حروف N، O و B به ترتیب معرف نمونه‌های جوشکاری شده با الکتروود Nilsil، آما ۲۰۰۰ و آما ۱۵۳۱ و B.M معرف فلز پایه و اندیس‌های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب نشان دهنده مدت زمان انجام آزمون خوردگی در ۱۰، ۲۰ و ۳۰ شبانه روز است.



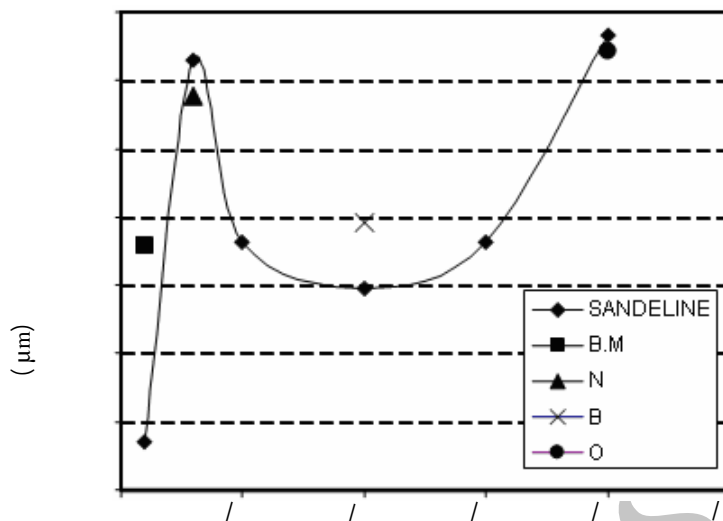
شکل ۵ تصاویر میکروسکوپی نمونه‌های جوشکاری شده با الکتروود Nilsil (الف) طرح پنخ نامتقارن، (نمونه C)، (ب) طرح پنخ متقارن (نمونه D)

متراکم خارج می‌شود. در این حالت، پایداری لایه δ کاهش یافته و لایه ضخیمی مرکب از δ و FeSi ایجاد می‌شود. این پوشش آلیاژی نمی‌تواند از خوردگی بیشتر فلز پایه جلوگیری نماید. در نتیجه نرخ خوردگی در نمونه جوشکاری شده با الکتروود آما ۲۰۰۰ حداکثر مقدار است. مقدار سیلیسیم برحسب ضخامت لایه در فلزجوش نمونه جوشکاری شده با الکتروود آما ۱۵۳۱ در قسمت انتهایی منحنی سندلین و در خارج از این محدوده واقع می‌شود. در این وضعیت علی‌رغم ضخامت نسبتاً بالای لایه δ ، مورفولوژی آن مانند δ حاصل از الکتروود Nilsil دیگر پیوسته و متراکم نبوده و پایداری آن نیز کمتر است. افزون بر این، لایه های آلیاژی تشکیل شده در این حالت شامل لایه نسبتاً ضخیمی از δ و لایه نازکی مرکب از δ و FeSi است. به عبارت دیگر الکتروود آما ۱۵۳۱ در ایجاد موضع اتصالی مقاوم در برابر خوردگی، کارایی الکتروود Nilsil را ندارد. از طرفی فلز پایه با حداکثر مقدار سیلیسیم ۰/۰۲ درصد وزنی قبل از محدوده سندلین واقع شده و دارای کمترین میزان ضخامت پوشش روی می‌باشد.

تشدید خوردگی در این نمونه می‌شود. مقایسه تأثیر درصد سیلیسیم در فلزجوش حاصل از الکتروودهای مزبور بر ضخامت پوشش روی- آهن ایجاد شده بر روی نمونه‌ها در طی آزمایش خوردگی به همراه منحنی سندلین در شکل (۸) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که اندازه گیری ضخامت پوشش روی- آهن در سطح نمونه‌ها توسط میکروسکوپ نوری و بعد از خارج نمودن آنها از وان مذاب صورت پذیرفت. همانطور که در شکل (۸) دیده می‌شود ضخامت پوشش ایجاد شده بر روی فلزجوش نمونه جوشکاری شده با الکتروود Nilsil در محدوده سندلین (0.05-0.11 درصد سیلیسیم) واقع شده که در این ناحیه پوشش آلیاژی از فاز δ با مورفولوژی پیوسته و متراکم حاکم است. البته لایه نازکی از فاز δ نیز تشکیل می‌شود. فاز δ مذکور همانند سدی، از خوردگی بدنه وان توسط مذاب روی جلوگیری می‌نماید. در مورد نمونه جوشکاری شده با الکتروود آما ۲۰۰۰، ضخامت پوشش تشکیل شده بر روی فلزجوش کاهش یافته و مورفولوژی لایه آلیاژی یادشده از حالت



شکل ۷ میزان کاهش وزن نمونه‌های مختلف در آزمایش خوردگی انجام شده در دمای $10 \pm 445^\circ\text{C}$ در وان مذاب روی (N: نمونه جوشکاری شده با الکتروود Nilsil، O: نمونه جوشکاری شده با الکتروود آما ۲۰۰۰، B: نمونه جوشکاری شده با الکتروود آما ۱۵۳۱) ۱۰:۱ شبانه روز نگهداری در وان، ۲۰:۲ شبانه روز نگهداری در وان، ۳۰:۳ شبانه روز نگهداری در وان



شکل ۸ منحنی سندلین به همراه تغییرات ضخامت پوشش روی با تغییر درصد سیلیسیم در نمونه‌های جوشکاری شده با الکترودهای Nilsil (N)، آما ۱۵۳۱ (B)، آما ۲۰۰۰ (O) و در فلز پایه (B.M).

آزمایش خمش، همه نمونه‌های آماده‌سازی شده به صورت Side bend تا زاویه ۱۸۰ درجه تحت خمش قرار گرفتند. در نتیجه این آزمایش هیچگونه ترکی مشاهده نشد و کلیه نمونه‌ها از انعطاف-پذیری خوبی برخوردار بودند.

۳- سختی کلیه نمونه‌ها در ناحیه جوش، بالاتر، در ناحیه فلز پایه کمتر و در ناحیه HAZ ما بین این دو می‌باشد. با مقایسه نواحی جوش سه الکتروود با یکدیگر، سختی ناحیه جوش در الکتروود آما ۲۰۰۰ بیشتر و در الکتروود Nilsil کمتر است.

۴- ریز ساختار نواحی جوش، فلز جوش و HAZ در نمونه‌های جوشکاری شده با الکترودهای آما ۲۰۰۰، آما ۱۵۳۱ و Nilsil فریتی با کمتر از ۱۰ درصد پرلیت بوده و فقط از لحاظ اندازه دانه‌های فریت متفاوت می‌باشند.

۵- در الکتروود آما ۲۰۰۰ با بالاترین درصد سیلیسیم، میزان رقت، ۴۰ درصد و بیشترین است، در الکتروود Nilsil با پائین‌ترین درصد سیلیسیم، میزان رقت،

از نتایج شکل‌های (۷ و ۸) استنباط می‌شود که علی‌رغم آنکه فلز جوش ناشی از الکتروود Nilsil در محدوده سندلین واقع شده است و ضخامت بالایی از پوشش روی بر سطح آن تشکیل می‌شود، لکن نوع مورفولوژی این پوشش باعث کاهش میزان خوردگی در آن می‌گردد. به عبارتی هر چه مقدار سیلیسیم کمتر باشد، میزان خوردگی ناشی از تماس با مذاب روی، کمتر می‌شود.

در پژوهش حاضر، با بررسی تأثیر نوع الکتروود و طرح پیچ بر خواص مکانیکی، خوردگی و ریزساختار مواضع جوشکاری شده نتایج ذیل حاصل گردید.

۱- استحکام کششی فلز جوش کلیه قطعات جوشکاری شده از فلز پایه بیشتر بوده و همه نمونه‌ها از محل فلز پایه و خارج از محل جوش شکستند.

۲- در بررسی خواص نرمی و انعطاف‌پذیری در

چسبندگی پوشش کاهش می‌یابد. به طور کلی نتایج آزمایشها دلالت دارند بر اینکه الکتروود کم سیلیسیم مقاومت قابل قبولی در مقابل حمله مذاب روی دارد. لذا فلز جوش حاصل از الکتروود Nilsil با ترکیبی نزدیک به فولاد پایه دارای رفتار خوردگی مشابه با آن است. از طرفی می‌توان نتیجه گرفت که مواد مصرفی جوشکاری با میزان سیلیسیم بالا برای استفاده در ساخت یا تعمیر وان‌های گالوانیزه گرم مناسب نیست، زیرا احتمال شکست سریع بعد از مدت زمان کاری کوتاهی حتی بدون در نظر گرفتن نقاط داغ وجود دارد. البته باید توجه خاصی به کیفیت جوش‌ها هنگام ساخت و تعمیر وان‌ها صورت گیرد و علاوه بر انتخاب الکتروود مصرفی با حداقل میزان سیلیسیم می‌بایست پارامترهای صحیح جوشکاری نیز رعایت شود.

۸- براساس این نتایج انتظار می‌رود ماده مصرفی آما ۱۵۳۱ با میزان سیلیسیم تا حدود ۰/۲ درصد نیز جوش‌هایی با عمر کاری رضایت بخشی ارائه دهد. ۹- مشخص گردید که مناسب‌ترین طرح پخ و الکتروود (از بین سه الکتروود مورد استفاده) برای جوشکاری ورق‌های وان گالوانیزه، طرح پخ X متقارن و الکتروود Nilsil می‌باشد.

لازم می‌دانیم از تمامی عزیزانی که در پژوهش‌ها توسعه تکنولوژی، شرکت آما (بالاخص آقای مهندس رحیمی) و شرکت سپنتا ما را در هر چه بهتر به انجام رسانیدن این تحقیق یاری نمودند تقدیر و تشکر نمایم.

۳۵ درصد و کمترین است و در الکتروود آما ۱۵۳۱ به میزان ۳۸/۶ درصد است. میزان سیلیسیم در پاس‌های نهایی به آنالیز الکتروود نزدیکتر است. لذا قابلیت جوش پذیری با افزایش سیلیسیم در پاس‌های نهایی الکتروود آما ۲۰۰۰ کمتر می‌شود. افزون بر این، در پاس‌های نهایی، ساختارستونی شکل مشاهده می‌شود.

۶- ضخامت اندازه‌گیری شده لایه‌های آلیاژی پوشش روی برحسب مقادیر مختلف سیلیسیم نشان می‌دهد که ضخامت لایه آلیاژی با تغییر مقدار سیلیسیم تغییر می‌کند. همچنین از مقایسه این نتایج با منحنی سندلین مشاهده می‌شود که ضخامت پوشش در فلز پایه کمترین بوده و قبل از محدوده سندلین قرار دارد؛ در نمونه‌های جوشکاری شده با الکتروود Nilsil افزایش یافته و در محدوده سندلین قرار می‌گیرد، با الکتروود آما ۱۵۳۱ کاهش یافته و بعد از محدوده سندلین واقع می‌شود و در الکتروود آما ۲۰۰۰ مجدداً در خارج از محدوده سندلین افزایش می‌یابد.

۷- میزان کاهش وزن و کاهش ابعاد در نمونه‌های جوشکاری شده با الکتروود پر سیلیسیم، بیشتر است. به عبارتی در این نمونه‌ها خوردگی بیشتر بوده و با گذشت زمان، میزان و عمق آن بیشتر می‌شود. همچنین، افزایش این عنصر از ۰/۲ درصد به ۰/۴ درصد در فولاد می‌تواند اثر زیادی بر شدت خوردگی بگذارد. ضخامت پوشش روی نیز با گذشت زمان افزایش می‌یابد ولی استحکام و

() .

2. Watson K.B., and Furphy A.S., "The Design and Construction of Steel Galvanizing Kettles For Long Life", The 4th Asia Pacific Galvanizing Confernece, Kualalumpur, Malaysia, pp. 1-4, (1999).

3. Watson K.B., Cannan B.C., Bosman M., and Li H., "Welding Consumables for Galvanizing Kettles", Welding Research Supplement, Vol.46, pp.33-39, (2001).
4. Tunney W., Konecny R.C., Ballitt R.W., and Cigan J.M., "Failure in Galvanizing Kettles", Proceeding of the Conference on Fracture Analysis of Galvanizing Kettles, Pennsylvania, U.S.A, pp.40-51, (1952).
5. <http://www.corbecgalv.com/Faq.html>
6. <http://www.galvanizeit.org>
7. Horstmann D., " The Influence of Impurities in Iron on Attack by Molten Zince", The 4th International Conference on Hot Dip Galvanizing, pp.58-67, (1956).
8. Mackwiak J., and Short N.R., "Metallurgy of Galvanizing Coatings", International Metals Reviews, Vol.24, No.1, pp. 1-19, (1969).
9. Jintang L., Chunshan C., Gang K., Qiaoyu X., and Jinbong C., "Influence of Silicon on the $\alpha - Fe/\Gamma$ Interface of Hot Dip Galvanizing Steels", Scripta Materiala Vol.200, No.18-19, pp.5277-5281, (2006).
10. Watson K.B., and Cannan B.G., "Welding Consumables for Galvanizing Kettles Assessment of Long term exposure Test Coupons", Welding Research, Under Publication.
11. Notowidjojo B.D., Wingrove A.L., and Kennon N.F., "Possible Source of Dross Formation in Zinc-0.1% Nickel Galvanizing Process", Material Forum, Vol.13, pp.73-75, (1989).
12. Pelerin J., Hoffman J., and Lerroy V., "Influence of Silicon and Phosphor on the Commercial Galvanization of Mild Steels", Metallurgical Transactions, Vol.35A. No.9, pp. 870-873, (1981).
13. Handbook Welding Consumables and Cutting and Grinding Wheels, AMA Industrial Co.
14. <http://www.metrode.com> (Data sheet DS.E-72,Nilsil).
15. ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section IX, Welding and Brazing Qualification, (QW-250), (1978).