مقاله

بررسی تغییر عناصر روکش الکترود ایی. ۶۰۱۳ بر بهبود خواص مکانیکی فلز جوش در جوشکاری قوس الکتریکی سی. کی. ۴۵

سهند کارگرنژاد*
عضو هیئت علمی گروه مهندسی مکانیک
گرایش ساخت و تولید
دانشگاه صنعتی ارومیه
s.kargarnejad@gmail.com

سامان خلیل‌پور آذری
عضو هیئت علمی گروه مهندسی مکانیک
گرایش ساخت و تولید
دانشگاه صنعتی ارومیه
s.khalilpour@mee.uut.ac.ir

فربد کاظمی
دانشجوی مهندسی مکانیک
گرایش ساخت و تولید
دانشگاه صنعتی ارومیه
farbod_kazemi@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۶/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۶/۳۱

چکیده

امروزه تحقیقات وسیعی به‌منظور بررسی تأثیر الکترودها در جوشکاری فولادهای آلیاژی انجام شده است. در این میان، انتخاب روکش مناسب برای الکترود نقش بسزایی در خواص نهایی جوش، اکسیژن‌زدایی از آن و حفاظت از حوضچهٔ مذاب در جوشکاری ایفا می‌کند. در این مقاله، آثار تغییر شاخص بازی در روکش الکترودهای ایی. ۶۰۱۳[۱] بر کیفیت جوش تولیدی، آنالیز شیمیایی فلز جوش و میزان استحکام مکانیکی آن در فرایند قوس الکتریکی بررسی شده است. برای این منظور از سه الکترود با مفتول یکسان و روکش‌هایی با شاخص بازی به‌ترتیب ۰/۲۶، ۰/۱۲ و ۰/۰۱۳ در جوشکاری فولاد سی. کی. ۴۵[۲] استفاده شده و پس از آن، جوش‌های تولیدشده به‌کمک دستگاه کوانتومتری، آزمایش کشش و ضربهٔ شارپی مطالعه شده است. نتایج حاصل از آزمایشات کشش و ضربه به‌روش شارپی نشان می‌دهد که با افزایش شاخص بازی الکترود، استحکام مکانیکی فلز جوش کاهش یافته و میزان مقاومت به ضربه در آن افزایش می‌یابد. همچنین استفاده از الکترود ایی. ۶۰۱۳ با شاخص بازی بالا بازده مناسبی را در کنترل و کاهش میزان فسفر و سیلیسیوم موجود در فلز جوش ایفا می‌نماید.

واژگان کلیدی: جوشکاری، قوس الکتریکی، شاخص بازی، الکترود، ضربهٔ شارپی

۱. مقدمه

جوشکاری به‌روش قوس الکتریکی شامل فرایند اتصال و پیوستگی مواد با گرم‌کردن آنها تا دمای جوشکاری و بدون اعمال فشار با استفاده از فلز پرکننده یا الکترود می‌شود [۱]. معمولاً تعیین نوع الکترود به‌کار رفته در جوشکاری قوس الکتریکی به جنس فلز پایه، ترکیب شیمیایی و خواص مورد نیاز جوش بستگی دارد. بنابراین الکترود انتخاب‌شده برای

جوشکاری اثر مهمی در پیدایش خواص نهایی جوش و کیفیت آن دارد. در حین فرایند جوشکاری روکش الکترود وظیفهٔ محافظت از حوضچهٔ مذاب و اکسیژن‌زدایی را برعهده دارد. مواد موجود در روکش الکترود در حین جوشکاری نقش سرباره را ایفا می‌کنند و با تغییر درصد و مواد موجود در حوضچهٔ مذاب سبب ایجاد خواص گوناگونی در منطقهٔ جوش می‌شوند. از این‌رو تاکنون تحقیقات متنوعی به‌منظور انتخاب روکش مناسب برای جوشکاری انجام شده است [۱]. از جمله پارامترهای مهم در انتخاب الکترود مناسب بررسی میزان شاخص بازی روکش الکترود است. این پارامتر میزان اسیدی و بازی‌بودن سربارهٔ تولیدشده در جوشکاری را تعیین می‌کند و معیاری از توانایی سرباره برای حذف گوگرد و کاهش میزان اکسیژن نامطلوب موجود در فلز جوش است [۱]. تولیانی و همکاران جهت تعیین میزان شاخص بازی در الکترودها رابطهٔ ۱ را برای روانسازهای جوشکاری پیشنهاد نموده‌اند [۲]. باید توجه داشت که در رابطهٔ مذکور، پارامتر BI نشان‌دهنده شاخص بازی است و افزایش آن سبب کاهش میزان اکسیژن در فلز جوش و کاستن از آخال‌های[۳] غیرفلزی می‌شود [۳]. از سوی دیگر، بالابودن این مقدار به مفهوم چقرمگی بالای فلز جوش و مقدار پایین آن بیانگر رفتار سرباره‌ای عالی برای الکترود است [۴]. بنابراین تعیین میزان مناسب برای این شاخص سبب حصول به خواص مناسب و ظاهر جوش قابل قبول در جوشکاری قوس الکتریکی می‌شود.

$$BI = \frac{CaO + CaF_2 + MgO + K_2O + Na_2O + Li_2O + \frac{1}{2}(MnO + FeO)}{SiO_2 + 0.5(Al_2O_3 + TiO_2 + ZrO_2)} \qquad (۱)$$

در این مقاله با تغییر مواد موجود در روکش الکترود ایی. ۶۰۱۳ با مفتول‌های مشابه سه الکترود با روکش‌های اسیدی و بازی و حالت بینابینی تولید و تأثیر آنها بر خواص مکانیکی فلز جوش و میزان ضربه‌پذیری آن بررسی شده است.

۲. مواد و روش تحقیق

۲-۱. تولید الکترودها

همان‌گونه که در بخش قبل عنوان شد، در این مقاله از سه الکترود ایی. ۶۰۱۳ با شاخص بازی متفاوت استفاده شده است. جنس مواد روکش و نیز مفتول‌ها برای ساخت هر سه نوع الکترود به‌صورت مشابه انتخاب گردید. ترکیبات مورد استفاده در تولید روکش هر یک از سه الکترود در جدول ۱ ذکر شده است. با توجه به این جدول مشخص می‌شود که تنها مواد متغیر جهت تغییر شاخص بازی در روکش الکترودها کربنات کلسیم و اکسید سیلیسیوم است که به‌ترتیب بیانگر بازی‌بودن و اسیدی‌بودن ترکیب روکش الکترود می‌باشد. با توجه به تعیین ترکیب شیمیایی روکش الکترودهای ایی. ۶۰۱۳ مورد استفاده میزان شاخص بازی برای هر یک از آنها از طریق رابطهٔ ۱ قابل محاسبه است. در جدول ۲ نیز مقادیر به‌دست آمده برای شاخص بازی الکترودها ذکر شده است.

۲-۲. فلز جوش

از الکترودهای ایی. ۶۰۱۳ تولیدشده برای جوشکاری درز V شکل بین دو صفحهٔ فلزی با ضخامت ۱۵ میلی‌متر و از جنس سی. کی. ۴۵ استفاده گردید. فرایند جوشکاری در این حالت بدون هیچ‌گونه پیش‌گرم اولیهٔ قطعات انجام شد. دلیل انتخاب این فولاد بالابودن درصد کربن در آن و حساسیت آن به وقوع ترک گرم است. در جدول ۳ ترکیب شیمیایی فولاد سی. کی. ۴۵ نشان داده شده است [۵].

۲-۳. پارامترهای جوشکاری

فرایند جوشکاری قوس الکتریکی با هر سه الکترود توسط دستگاه جوش اینورتر ۲۰۰ آمپر ساخت شرکت محک[۴] انجام شد. برای جوشکاری از ولتاژ مدار باز ۹۵ ولت و ۱۶۰

آمپر استفاده گردید. کیفیت ظاهری مشاهده‌شده در هر سه الکترود در حین جوشکاری توسط اپراتور طبق جدول ۴ گزارش شده است. لازم به‌ذکر است در این جدول تعداد علامت + نشان‌دهندهٔ برتری الکترود در آن بخش می‌باشد.

جدول ۱. درصد وزنی ترکیبات موجود در روکش الکترودهای تولیدی

ترکیبات	در صد وزنی مواد روکش الکترود		
	الکترود شمارهٔ ۱ (درصد)	الکترود شمارهٔ ۲ (درصد)	الکترود شمارهٔ ۳ (درصد)
روتیل	۵۵	۵۵	۵۵
کربنات کلسیم	–	۷/۵	۱۵
اکسید سیلسیوم یا کانی‌های حاوی آن	۳۵	۲۷/۵	۲۰
سلولز	۲	۲	۲
منگنز	۸	۸	۸

جدول ۲. مقادیر شاخص بازی در هر یک از سه الکترود ایی. ۶۰۱۳ تولیدشده

شمارهٔ الکترود	میزان شاخص بازی
۱	۰/۲۶
۲	۰/۱۲
۳	۰/۰۱۳

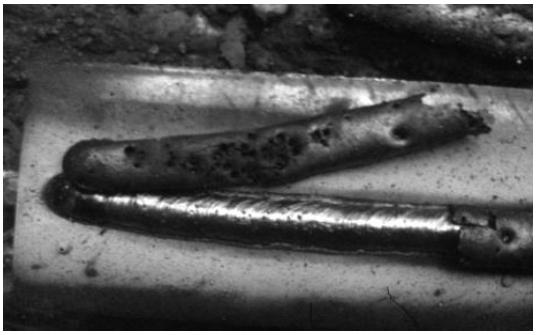
جدول ۳. ترکیب شیمیایی فولاد سی. کی. ۴۵ [۵]

عناصر	درصد وزنی
کربن	۰/۴۶
سیلیسیوم	۰/۴
منگنز	۰/۶۵
کروم	۰/۴
مولیبدن	۰/۱
نیکل	۰/۴
وانادیم	–
تنگستن	–

جدول ٤. مقایسهٔ شرایط فیزیکی جوشکاری در سه الکترود با جنس روکش‌های متفاوت

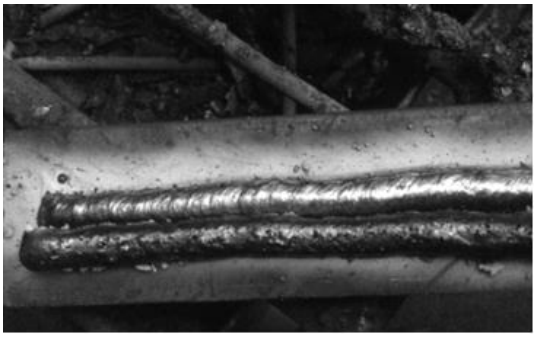
ویژگی	الکترود شمارهٔ ۱	الکترود شمارهٔ ۲	الکترود شمارهٔ ۳
سیالیت ظاهری مذاب	+	++	+++
پاشش کم مذاب	+	+++	+
ذوب آسان	+	+++	++
ظاهر جوش	++	+++	+
قابلیت جداکردن سرباره	+	+++	++
جوش در حالت عمودی	+	++	+++

در شکل ۱ نمونه‌های جوشکاری‌شده از هر سه الکترود نمایش داده شده است.



(الف)

(ب)



(ج)

شکل ۱. جوش تولیدشده توسط الف) الکترود شمارهٔ ۱، ب) الکترود شمارهٔ ۲، ج) الکترود شمارهٔ ۳

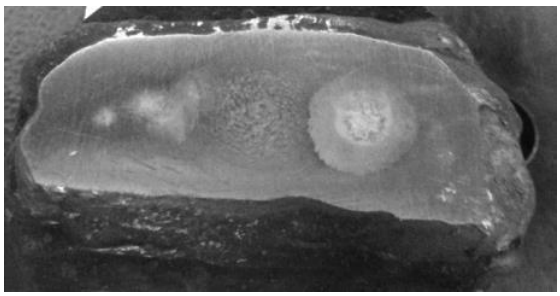
۳. بحث و بررسی

۳-۱. بررسی آنالیز شیمیایی فلز جوش

با توجه به شکل ۱، هر یک از سه الکترود به‌طور مجزا و به‌صورت چهار لایهٔ رویهم جوشکاری شده است. سپس با استفاده از دستگاه فرز، به‌میزان ۲ میلی‌متر از سطح فلز جوش ماشینکاری می‌شود و توسط دستگاه کوانتومتر ثابت آنالیز شیمیایی از فلز جوش به‌عمل می‌آید [۶]. نتایج این بررسی در جدول ۵ ارائه شده است. شکل ۲ نیز نمایی از سطح جوش بعد از اجرای فرایند فرزکاری را نمایش می‌دهد.

جدول ۵. ترکیب شیمیایی تعیین‌شده برای فلز جوش توسط دستگاه کوانتومتری

الکترود شمارهٔ	درصد ترکیبات شیمیایی موجود در فلز جوش				
	کربن	سیلیسیوم	منگنز	فسفر	گوگرد
۱	۰/۰۷	۰/۲۱	۰/۴۱	۰/۰۲۷	۰/۰۳۹
۲	۰/۰۷۲	۰/۳۱	۰/۳۹	۰/۰۳۶	۰/۰۳۹
۳	۰/۰۶	۰/۵۴	۰/۴۰	۰/۰۳۵	۰/۰۳۶

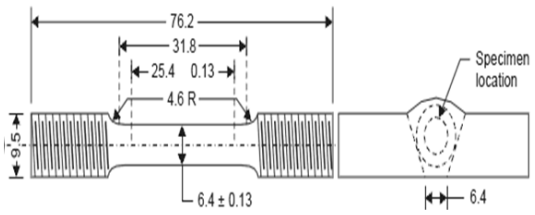


شکل ۲. نمایی از سطح فرزکاری‌شدهٔ فلز جوش به‌عمق ۲ میلی‌متر

۳-۲. بررسی استحکام مکانیکی فلز جوش

به‌منظور تعیین مقادیر استحکام کششی، استحکام تسلیم و درصد ازدیاد طول نمونه‌ای از نوع کششی و از سرتاسر فلز جوش براساس استاندارد ASTM A370 تهیه گردید [۷]. در شکل ۳ استاندارد تعیین‌شده برای تهیهٔ نمونه نمایش داده شده است. بدین ترتیب بعد از تعیین طول استاندارد نمونه، آن را مابین دو فک دستگاه کشش ساخت شرکت آذر هونام پارس[5] قرار داده، به‌تدریج نیروی کششی بر آن اعمال می‌شود تا نمونه پاره شود. در جدول ۶ مقادیر

به‌دست آمده برای هریک از الکترودهای ایی. ۶۰۱۳ ذکر شده است.



شکل ۳. نمایی از استاندارد تعیین شده برای نمونهٔ آزمایش کشش از نوع سرتاسر فلز جوش

۳-۳. انجام تست ضربه روی نمونه‌های الکترود ایی. ۶۰۱۳

آزمایش ضربه چقرمگی نسبی جوش را در مقایسه با فلز قطعه‌کار یا مقدار انرژی لازم و مقاومت نمونه را برای شکست آن نشان می‌دهد [۸]. در این مقاله، برای آزمایش ضربه جوش‌های تولیدشده از روش شارپی و مطابق با استاندارد ASTM A370 استفاده شد. برای این منظور، نمونه‌های مورد نیاز آزمایش به‌طور عرضی از جوش تهیه شدند، به‌طوری‌که جوش در وسط نمونه قرار بگیرد. برای انجام آزمایش نیز از دستگاه تست ضربه شارپی فلزات مدل B-300 ساخت شرکت پکای ایران[۶] استفاده شد. در شکل ۴ نمونهٔ تهیه‌شده قبل و بعد از انجام آزمایش ضربه برای الکترود شمارهٔ ۲ نمایش داده شده است.

در جدول ۷ نیز مقادیر به‌دست آمده برای آزمایش ضربه به‌روش شارپی ارائه شده است. با توجه به نتایج آزمایشات می‌توان به این نتایج رسید:

۱. طبق نتایج جدول ۴ برای جوشکاری الکترودها با بازیسیتهٔ بیشتر نیاز به انرژی بیشتری است؛ یعنی برای جوشکاری الکترود بازی‌تر آمپراژ بالاتری مورد نیاز است.

۲. طبق نتایج جدول ۵ الکترود بازی، بازده بالاتری در کنترل و تصفیهٔ فسفر به‌عنوان فلز نامطلوب در ترکیب فلز جوش دارد. همچنین طبق نتایج جدول ۵ با افزایش شاخص بازی مقدار سیلیسیوم کمتری در فلز جوش تولیدشده مشاهده می‌شود. جدول نیز ۶ نشان می‌دهد که با افزایش شاخص بازی در فلز جوش استحکام مکانیکی کاهش می‌یابد. در نهایت جدول ۷ بیانگر این واقعیت است که با کاهش شاخص بازی مقاومت به ضربهٔ فلز جوش نیز تقلیل یافته است. علت این امر احتمالاً به‌دلیل وجود میزان اکسیژن پایین‌تر در فلز جوش تولیدشده با الکترود دارای شاخص بازی بالاتر می‌باشد [۸].

شکل ٤. نمونهٔ تهیه‌شده برای انجام آزمایش ضربهٔ شارپی

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله، تأثیر روکش الکترودهای ایی. ۶۰۱۳ با تغییر در میزان شاخص بازی آنها در جوشکاری قوس الکتریکی بررسی شد. برای این منظور، سه الکترود با مفتول یکسان و روکش‌هایی با شاخص بازی به‌ترتیب ۰/۲۶، ۰/۱۲ و ۰/۰۱۳ در جوشکاری فولاد سی. کی ۴۵ استفاده گردید. سپس جوش‌های تولیدشده از نظر کیفیت ظاهری، استحکام مکانیکی و آنالیز شیمیایی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. نتایج حاصل از آزمایشات کشش و ضربه به‌روش شارپی نشان می‌دهد که کاهش شاخص بازی الکترود، استحکام مکانیکی فلز جوش افزایش می‌دهد و میزان مقاومت به ضربه را پایین می‌آورد. همچنین مشخص شد که شاخص بازی بالا در روکش الکترود بازده مناسبی را در کاهش میزان نفوذ عناصر فسفر و سیلیسیوم در فلز جوش نهایی فراهم می‌آورد.

جدول ٦. مقادیر تعیین‌شده برای استحکام فلز جوش در آزمایش کشش

ویژگی	الکترود ۱	الکترود ۲	الکترود ۳
استحکام تسلیم (مگاپاسکال)	۲۵۰	۴۰۰	۴۴۰
استحکام کشش (مگاپاسکال)	۳۶۰	۵۲۰	۵۵۰
درصد ازدیاد طول (درصد)	۱۶	۲۷	۲۴

جدول ۷. نتایج آزمایش ضربهٔ شارپی برای فلز جوش تولیدشده با هر یک از سه الکترود ایی. ٦٠١٣ در دمای ۲۳ درجهٔ سانتی‌گراد

شمارهٔ فلز جوش متناسب با شمارهٔ الکترود	مقادیر برحسب ژول
۱	۸۹
۲	۸۱
۳	۶۷

۵. مآخذ

[1] Weman, K. *Welding Processes Handbook*, CRC Press, 2003.

[2] Charles, A., C.A. Natalie, M. Brander. "Physical and Chemical Behavior of Welding Fluxes." *Annual Review of Materials Science*, Vol. 16, No. 3, 1986, pp. 389-413.

[3] Kou, S. *Welding Metallurgy*, John Wiley & Sons, 2003.

[4] Qin, R., G. He. "Mass Transfer of the Nickel-Base Alloy Covered Electrode with Neutral Flux Coating during Shielded Metal Arc Welding." *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 78, No.1, 2014, pp.1095–1104.

[5] Kutz, M. *Handbook of Materials Selection*, John Wiley & Sons, 2002.

[6] ASM Metals Handbook, *Welding, Brazing and Soldering*, American Society of Metals, Vol. 6, 2001.

[7] Kanjilal, P., T.K. Pal, S.K. Majumdar. "Combined Effect of Flux and Welding Parameters on Chemical Composition and Mechanical Properties of Submerged Arc Weld Metal." *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 171, No.2, 2006, pp. 223–231.

[8] Hsieh, K.C., S.S. Babu, J.M. Vitek, S.A. Daivid, "Calculation of Inclusion Formation in Low Alloy Steel Welds." *Journal of Materials Science and Engineering: A*, Vol. 215, No. 1–2, 1996, pp.84-91.

پی‌نوشت

۵. سازندهٔ تجهیزات تست آزمایشگاه لوله و اتصالات و ورق پلیمر، دستگاه جوش پلاستیک، سیستم‌های کنترلی آنلاین خط تولید، ماشین‌آلات تولید اتصالات پلی‌اتیلنی الکتروفیوژن

۶. تأمین‌کنندهٔ انواع تجهیزات اندازه‌گیری دقیق ابعاد، جرم، وزن، سختی‌سنجی و سایر ابزار دقیق آزمایشگاه‌های کالیبراسیون و کنترل کیفیت

http://www.pka-co.com/index.php/fa
(accessed October 4, 2014)

1. E6013
2. Ck45
۳. هر نوع ذرات غیرفلزی محبوس‌شده در فلز جوش (ذرات سربارهٔ محبوس‌شده) را در اصطلاح آخال (Inclusion) می‌نامند.
4. MAHAK Power Tools, http://www.mahak.ir (accessed October 3, 2014)