



اثر کربن و بور بر ریزساختار و سختی لایه روکش سخت پایه آهنی ایجاد شده به روش جوشکاری قوسی توپودری

محمدرضا توکلی شوشتری¹، مسعود گودرزی^{2*}، حامد ثابت³

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

2- دانشیار، مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

3- دانشیار، گروه مهندسی مواد و متالورژی، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران

* تهران، صندوق پستی 16765-163 mgoodarzi@iust.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

دریافت: 96/06/12

پذیرش: 96/10/11

کلیدواژگان:

جوشکاری قوسی توپودری

روکش کاری سخت

Fe-B

ریزساختار

پاس جوشکاری

در این تحقیق، با استفاده از دو سیم جوش مغزه دار حاوی پودر پایه Fe-B و Fe-B-C، عملیات روکش کاری سخت بر روی فولاد st37 به روش FCAW (جوشکاری قوسی توپودری)، طی سه فرایند تک پاسی، دو پاسی و سه پاسی انجام پذیرفت. نتایج نشان داد با افزایش تعداد پاس در هر دو سیم جوش، درصد بور منطقه جوش نیز از 2.3 تا 3.18 درصد وزنی افزایش می‌یابد که این امر را می‌توان به دلیل حضور بیشتر بور در مذاب جوش به دلیل افزایش حجم سیم جوش در هر پاس از فرایند جوشکاری دانست. همچنین بررسی‌های آنالیز فازی با استفاده از تفرق اشعه ایکس (XRD) و نیز آنالیز ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ های نوری و الکترونی روبشی (SEM) نشان داد با استفاده از سیم جوش Fe-B فرایند جوشکاری تک پاسی منجر به ایجاد زمینه فریت و یوتکتیک α -Fe₂B می‌گردد که در فرایند دو پاسی نسبت به فرایند تک پاسی جزایر فریتی کمتر شده و در عوض میزان یوتکتیک α -Fe₂B افزایش می‌یابد. فرایند جوشکاری پاس سوم منجر به ایجاد ذرات اولیه Fe₂B ستونی شکل و یوتکتیک α -Fe₂B می‌گردد. حضور کربن در سیم جوش Fe-B-C باعث تشکیل جزایر پرلیتی در کنار ذرات اولیه Fe₂B خواهد شد. همچنین در پاس سوم جوشکاری با هر دو سیم جوش، مقادیر بسیار کمی فاز FeB در اطراف فاز Fe₂B اولیه تشکیل می‌شود. حضور ترکیب FeB را نیز می‌توان به دلیل جدایش عنصر بور در جوشکاری طی انجام غیر تعادلی دانست. نیز افزایش سختی بدست آمده را می‌توان به دلیل افزایش بور در اثر افزایش تعداد پاس های جوشکاری دانست.

The effect of carbon and boron addition on microstructure and hardness of iron-based hardfacing layer using flux-cored arc welding

Mohammadreza Tavakoli-Shoushtari¹, Massoud Goodarzi^{1*}, Hamed Sabet²

1-School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran

2- Department of Materials Engineering, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran

* P.O.B. 16765-163, Tehran, Iran, mgoodarzi@iust.ac.ir

Keywords

Flux-cored arc welding
Hardfacing
Fe-B
Microstructure
welding passes

Abstract

In present investigation, hard claddings treatment was performed on st37 steel using two cored wires containing Fe-B and Fe-B-C powder-based by FCAW (Flux Cored Arc Welding) method during three stages of single pass, two-pass and three-pass welding process. Results indicated that the increasing of welding pass numbers for both welding wire, boron percentage was improved from 2.3 to 3.18 wt. % at weld metal due to more presence of boron in welding melt which caused volume increase of welding wire at each welding pass. Microstructure observation and phase analysis using optical and scanning electron microscopes and X-ray diffraction (XRD) results also expressed that the using of Fe-B electrode for single pass welding process caused to create a ferrite matrix and α -Fe₂B eutectic; for two-pass welding process compared to single pass ferrite islands have been decreased, while the amount of α -Fe₂B eutectic have been increased. Third pass of welding process caused to form α -Fe₂B eutectic and primary particles of Fe₂B which had columnar shape. Presence of carbon in Fe-B-C electrode will form pearlite islands beside primary Fe₂B. Also, at third pass of welding process by both electrodes, very low amount of FeB phase would be formed around the Fe₂B primary phase. Formation of FeB compound related to segregation of boron element during welding and non-equilibrium solidification. The increase in hardness can also be attributed to an increase in the amount of boron due to the increasing number of welding passes.

Please cite this article using:

Tavakoli-Shoushtari, M.R. Goodarzi, M. and Sabet, H., "The effect of carbon and boron addition on microstructure and hardness of iron-based hardfacing layer using flux-cored arc welding", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 05, No. 02, pp. 245-252, 2018.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

1- مقدمه

ریزساختار و سختی لایه روکش سخت پایه Fe-B که بر روی فولاد ساده کربنی اعمال می شود، مطالعه و بررسی می گردد.

2- روش تحقیق

در این تحقیق از فولاد ساده کربنی St37 با ابعاد 10*200*200 میلی متر به عنوان فلز پایه (زیرلایه) استفاده شد. قبل از جوشکاری اکسیدهای سطحی فلز پایه به کمک سنباده زنی زوده شدند و سپس توسط استون چربی زدایی گردیدند. روکش کاری سخت به روش FCAW مطابق با پارامترهای ارائه شده در جدول 1 انجام شد. لازم به ذکر است که پارامترهای جوشکاری براساس کد ASME Sec 9, QW216 & QW400 تعیین شدند. همچنین فرایند جوشکاری ذکر شده در جدول 1 بر روی 6 نمونه مطابق جدول 2 انجام گرفت. طبقه بندی نمونه ها بر اساس سیم جوش و تعداد پاس می باشد به طوری که سه نمونه با سیم جوش Fe-B طی سه فرایند جوشکاری یک پاسی، دو پاسی و سه پاسی جوشکاری شده و سه نمونه دیگر نیز با سیم جوش Fe-B-C طی سه فرایند جوشکاری یک پاسی، دو پاسی و سه پاسی جوشکاری گردید. شکل 1، نمای شمار لایه های جوشکاری شده را نشان می دهد.

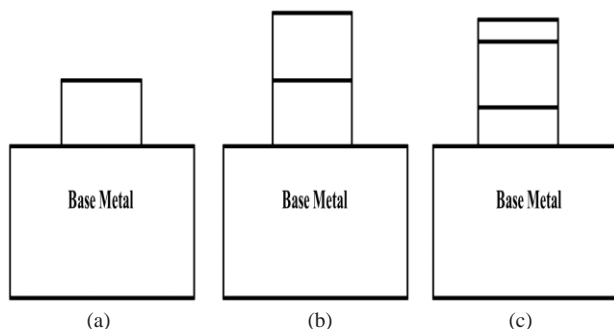


Fig. 1 a view of the number and how layers (passes) are in the welded samples

شکل 1 نمایی از شمار و چگونگی لایه ها (پاس ها) در نمونه های جوشکاری شده (a) یک پاس، (b) دو پاس و (c) سه پاس

نمونه های جوشکاری شده بر اساس جنس سیم جوش و تعداد پاس به ترتیب مشخص شده در جدول 2 نام گذاری شد.

جدول 1 پارامترهای جوشکاری

Table 1 welding parameters

شرایط جوشکاری	
FCAW-Self Shielded	فرایند جوشکاری
15% Ferroboreon +1% Graphite powder + 9% [TiO ₂ + Na ₂ CO ₃]	پودر مصرفی در سیم توپودری (wt.%)
30-32	سرعت جوشکاری (cm/min)
700	سرعت تغذیه سیم (cm/min)
2.8	قطر سیم (mm)
DCEP	قطب بندی
17-18	حرارت ورودی هر پاس (kJ/cm)
4-5	طول قوس (mm)
400-450	شدت جریان (A)

سایش یکی از مهم ترین عوامل تخریب قطعات مهندسی در صنعت است [1-2]. یکی از راه های کنترل سایش در قطعات و اجزاء ماشین آلات مهندسی ایجاد لایه های مقاوم به سایش در سطح قطعات است [3-6]. ایجاد این لایه های روکش سخت، می تواند به روش ها و در ضخامت های سطحی مختلفی انجام شود که روکش های حاصل از عملیات جوشکاری به علت صرفه اقتصادی و ایجاد لایه های نسبتاً ضخیم و مقاوم نسبت به سایر روش ها، در شرایط سایش خراشان و ضربه ارجحیت دارند [6-8]. از میان روش های جوشکاری قوسی، فرایند جوشکاری قوسی توپودری (FCAW)، به علت نرخ رسوب بالا و بازده مناسب، فرایندی اقتصادی بوده و از آنجا که قابلیت اتوماسیون دارد می تواند در تولید انبوه روکش کاری مواد مختلف مورد استفاده قرار گیرد [1]. آلیاژهای مورد استفاده جهت ایجاد لایه های روکش سخت بر روی فولادهای کربنی و کم آلیاژ به دو دسته آلیاژهای آهنی و آلیاژهای غیرآهنی تقسیم بندی می شوند. آلیاژهای پایه آهنی به علت قیمت مناسب و مقاومت به سایش بالاتر نسبت به آلیاژهای پایه غیر آهنی بیشتر مورد توجه محققین و صنعتگران بوده اند [1، 8]. تجهیزات سنگ شکن ها و اسباب ها و تجهیزات خاک برداری تحت شرایط سایشی شدید و اغلب نیازمند زمان کمی برای تعمیر و بازسازی می باشند. به همین دلیل سخت کاری سطحی این قطعات با مقادیر بسیار زیادی از آلیاژهای پایه آهن، با کم ترین هزینه و زمان انجام می پذیرد [8-10]. بور در بسیاری از سیستم های آلیاژی روکش سخت به عنوان یک عنصر آلیاژی در کنار کربن و سایر عناصر آلیاژی مورد استفاده قرار گرفته است. آلیاژ Fe-C-B نوع جدیدی از آلیاژهای روکش سخت می باشد که در چند سال اخیر، بیش تر مورد توجه محققین قرار گرفته است [9، 12-13]. اضافه نمودن عناصر آلیاژی مانند بور به سیستم های آلیاژی روکش سخت، و انجماد سریع آنها در اثر فرایند جوشکاری سبب ایجاد ریزساختار ریزدانه شامل فازهای سخت می شود که ترکیبی از سختی سطح و چقرمگی عالی آلیاژهای روکش سخت را به همراه دارد [4]. بور در مقادیر خیلی کم در فریت حل شده و باعث ایجاد سختی و مقاومت به سایش می شود [6]. در سال های اخیر سیم جوش های غنی از بور جهت ایجاد روکش هایی با خواص ویژه از جمله مقاومت به سایش خراشان عالی و مقاومت فرسایشی در دمای بالا ساخته شده است. این سیم جوش با تشکیل لایه های بوراید آهن (Fe₂B و FeB) به طور چشم گیری موجب بهبود رفتار سایشی، خوردگی و اصطکاک پس از اعمال روکش شده است [14]. Bourithis و همکارانش [15]، پودر بور خالص را برای ایجاد لایه بورایدی بر روی فولاد ساده کربنی با استفاده از روش جوشکاری قوسی پلاسما¹ (PTA) استفاده کردند و نشان دادند که این روش، یک تکنیک مطمئن برای ایجاد لایه های یکنواخت بورایدی است. Yüksel و همکارش [4]، مخلوط پودر های فروبور و فروکروم با نسبت های مختلف را برای ایجاد لایه روکش سخت بر روی فولاد ساده کربنی به روش جوشکاری قوس باز استفاده کردند و نشان دادند که با افزایش میزان بور و کنترل ریزساختار، سختی و مقاومت به سایش افزایش می یابد.

سیم جوش های مغزه دار غنی از بور در سخت کاری سطحی بعضی کاربردهای صنعتی با روش های اسپری یا جوشکاری مورد استفاده قرار می گیرند [4]. در این پژوهش، به روش جوشکاری قوس باز و با استفاده از پودر فروبور به عنوان منبع بور، اثر میزان عنصر بور و افزودن عنصر کربن بر

¹ Flux Cored Arc Welding

² Plasma Transferred Arc Welding

جدول 2 فرایند های جوشکاری و کد گذاری نمونه ها

Table 2 Welding processes and sample coding

Sample code	Cored Wire	Pass number
Fe-B-1	Fe-B	1
Fe-B-2	Fe-B	2
Fe-B-3	Fe-B	3
Fe-B-C-1	Fe-B-C	1
Fe-B-C-2	Fe-B-C	2
Fe-B-C-3	Fe-B-C	3

پس از جوشکاری، نمونه هایی از سطح فلز پایه و لایه های مناطق جوش تهیه و به روش آزمون اسپکترومتری نشر نوری (OES) با دستگاه OXFORD INSTRUMENT مدل WAS مورد آنالیز ترکیب شیمیایی قرار گرفت. علاوه بر این مقدار بور از طریق آزمون اسپکترومتری نشری پلاسما جفت شده القایی (ICP-AES) بر اساس استاندارد ASTM D4951 و با دستگاه مدل intertek اندازه گیری شد. بدین منظور، دست کم سه نقطه مختلف از هر لایه، مورد آزمون قرار گرفت که میانگین نتایج آنها به عنوان معیار ترکیب شیمیایی آن لایه در نظر گرفته شد. جهت آزمون متالوگرافی، نمونه ها هم به صورت عمودی و هم به صورت افقی برش خورده و مورد مانت و آماده سازی قرار می گیرد. پس از آماده سازی نمونه ها توسط نایتال 10 درصد اچ شده و به وسیله میکروسکوپ نوری مدل Olympus BX51M و میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FE-SEM) مدل MIRA3 مورد بررسی ساختاری قرار گرفت. همچنین جهت بررسی آنالیز ترکیبات مختلف مشاهده شده در ساختار آنالیز عنصری EDS نیز مورد استفاده قرار گرفت. جهت بررسی فازهای مختلف تشکیل شده در نمونه ها، آزمون پراش پرتو ایکس (XRD) در محدوده زاویه ای 5-80 درجه به وسیله دستگاه Philips X'Pert MPD بر روی منطقه جوش انجام گرفت و نتایج به دست آمده توسط نرم افزار X'Pert High score تحلیل شد. جهت بررسی سختی منطقه جوش، آزمون سختی سنجی ماکرو به روش ویکرز با دستگاه یونیورسال مدل wolpert که در آن فرورونده هرم الماسه و نیروی اعمالی 10 Kgf می باشد، بر روی نمونه های برش خورده به صورت افقی انجام پذیرفت. لازم به ذکر است که جهت افزایش دقت نتایج آزمون سختی ماکروسکوپی، حداقل 3 نقطه از هر نمونه تحت آزمون قرار گرفتند که متوسط نتایج آنها معیار سختی سطح در نظر گرفته شد.

3- نتایج و بحث

3-1- آزمون ترکیب شیمیایی

جدول 3 ترکیب شیمیایی فلز پایه و لایه های روکش سخت را در پاس های مختلف ارائه می دهد. همانطور که مشاهده می شود نکته مهم در ترکیب شیمیایی نمونه های مختلف درصد بور آنها می باشد. در هر دو گروه نمونه جوشکاری شده با سیم جوش Fe-B و سیم جوش Fe-B-C مشاهده می گردد که با افزایش تعداد پاس درصد بور منطقه جوش نیز افزایش می یابد که این امر را می توان به دلیل حضور بیشتر بور در مذاب جوش به دلیل افزایش حجم سیم جوش در هر پاس از فرایند جوشکاری دانست. به طور متوسط می توان گفت که با افزایش هر پاس جوشکاری بور منطقه جوش به میزان 0.35 افزایش یافته است.

3-2- آزمون متالوگرافی

تصاویر متالوگرافی نوری از لایه های روکش سخت در نمونه های مختلف به شرح ذیل مورد بررسی قرار می گیرد.

جدول 3 ترکیب شیمیایی (درصد وزنی) فلز پایه و لایه های روکش سخت

Table 3 Chemical composition (% by weight) of base metal and hardfacing layers

Sample	C	Si	Mn	B	Fe
Base metal	0.022	0.01	0.14	-	Bal.
Fe-B-1	0.041	0.14	0.20	2.3 ₀	Bal.
Fe-B-2	0.054	0.16	0.21	2.6 ₆	Bal.
Fe-B-3	0.06	0.18	0.34	3.1 ₈	Bal.
Fe-B-C-1	0.33	0.39	0.19	2.2 ₁	Bal.
Fe-B-C-2	0.35	0.43	0.21	2.7 ₃	Bal.
Fe-B-C-3	0.38	0.50	0.25	3.1 ₂	Bal.

3-2-1- نمونه جوشکاری شده با سیم جوش Fe-B شامل فرایند یک پاس جوشکاری (Fe-B-1)

شکل 2 تصویر میکروسکوپ نوری از مقطع عمودی و افقی نمونه جوشکاری شده با سیم جوش Fe-B شامل فرایند یک پاس جوشکاری (Fe-B-1) را نشان می دهد. همانطور که در هر دو مقطع عمودی و افقی شکل 2 مشاهده می گردد فرایند جوشکاری منجر به ایجاد زمینه فریت و یوتکتیک α -Fe₂B بر اساس دیاگرام فازی آهن-بور (شکل 3) و دیاگرام آهن کربن می گردد. تصویر جزایر فریتی و یوتکتیک حاصل از فرایند انجماد جوش را می توان در تصویر میکروسکوپ الکترونی شکل 4 به صورت بهتری مشاهده نمود. حضور فاز α و Fe₂B توسط آنالیز EDS و XRD در شکل های 4 و 5 (الف) تایید می شود. همانطور که از شکل 4 مشاهده می گردد یوتکتیک α -Fe₂B تصویر اثر انگشتی (لایه لایه) از لایه های متوالی α و Fe₂B می باشد که تقریباً به صورت پرلیت در ساختار مشاهده می گردد. جزایر مشاهده شده فریتی را می توان بر اساس دیاگرام شکل 3 به این صورت توضیح داد که با انجام فرایند انجماد ذوب با توجه به درصد بور موجود در آلیاژ، ابتدا خط انجماد از منطقه α عبور کرده و منجر به ایجاد فریت پری یوتکتیک می گردد. با ادامه فرایند انجماد و رسیدن به خط یوتکتیک، مذاب به ترکیب یوتکتیک α -Fe₂B تبدیل شده و لایه های پی در پی α و Fe₂B در ساختار ظاهر می گردند. شکل 6 شماتیک مکانیزم تشکیل جزایر فریتی و یوتکتیک α -Fe₂B را نشان می دهد.

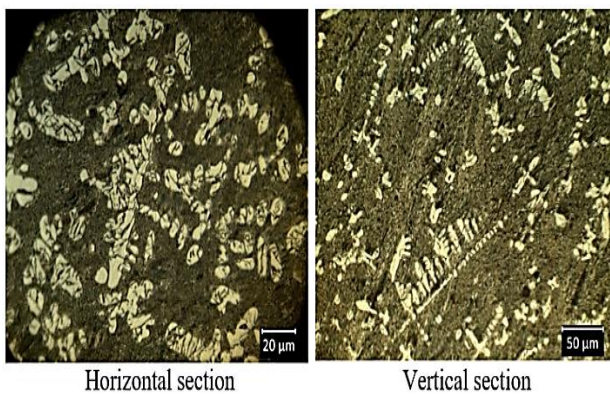


Fig. 2 Optical microscopic images of the vertical and horizontal sections of the sample welded with Fe-B welding wire include a single-pass welding process (Fe-B-1)

شکل 2 تصاویر میکروسکوپ نوری از مقطع عمودی و افقی نمونه جوشکاری شده با سیم جوش Fe-B شامل فرایند یک پاس جوشکاری (Fe-B-1)

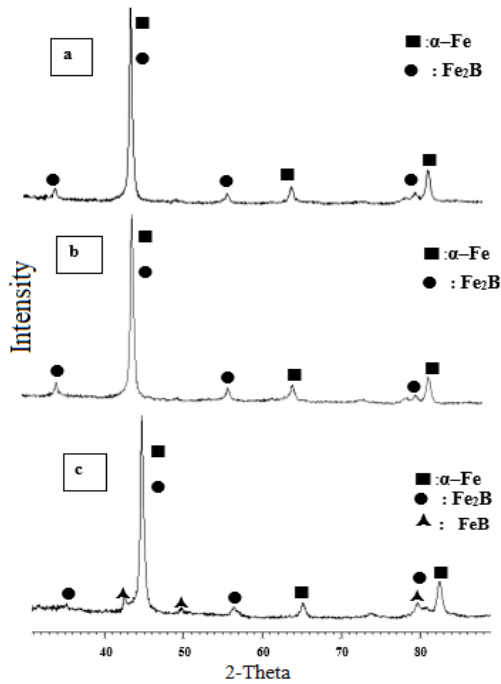


Fig. 5 X-ray diffraction pattern (XRD) from samples a) Fe-B-1, b) Fe-B-2 and c) Fe-B-3

شکل 5 الگوی پراش پرتو ایکس (XRD) از نمونه های (a) Fe-B-1، (b) Fe-B-2 و (c) Fe-B-3

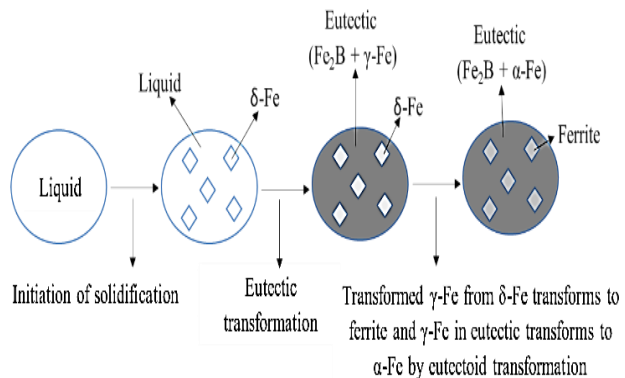


Fig. 6 Schematic of the formation of ferritic islands and α -Fe₂B eutectic in the Fe-B-1 sample

شکل 6 شماتیک مکانیزم تشکیل جزایر فریتی و یوتکتیک α -Fe₂B در نمونه Fe-B-1

همانطور که مشاهده می گردد فرایند جوشکاری مانند جوشکاری پاس اول منجر به ایجاد زمینه فریت و یوتکتیک α -Fe₂B بر اساس دیاگرام شکل 3 و دیاگرام آهن کربن می گردد. تصویر جزایر فریتی و یوتکتیک حاصل از فرایند انجام جوش را می توان در شکل 7 مشاهده نمود. حضور فاز α و Fe₂B توسط آنالیز EDS و XRD در شکل های 7 و 5 (ب) تایید می شود. مقایسه تصاویر حاصل از جوشکاری فرایند یک پاسی و فرایند دو پاسی نشان می دهد که در فرایند دو پاسی نسبت به فرایند یک پاسی جزایر فریتی کمتر شده و در عوض میزان یوتکتیک α -Fe₂B افزایش می یابد که این امر را میتوان به دلیل افزایش بور و نزدیک شدن خط انجماد به نقطه یوتکتیک دانست.

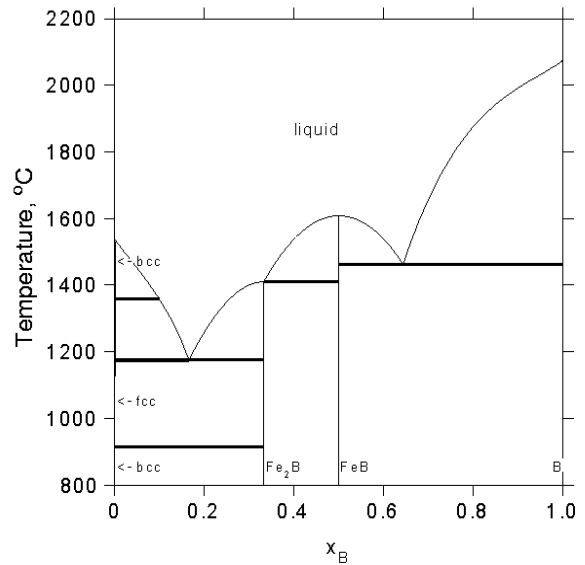


Fig. 3 Fe-B phase diagram

شکل 3 دیاگرام فازی آهن-بور

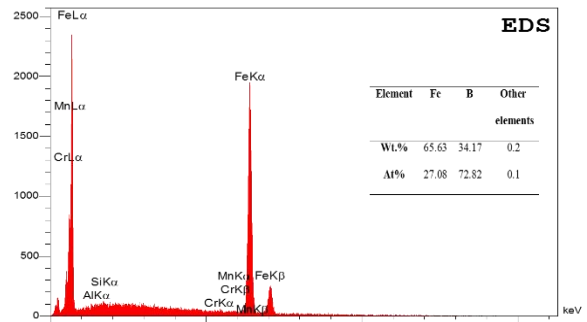
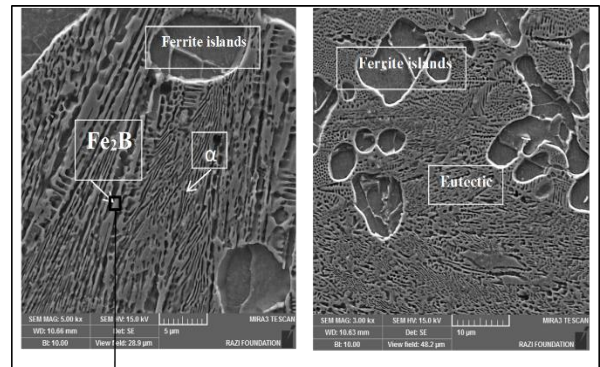


Fig. 4 Images of SEM electron microscopy from the welding section of Fe-B-1 sample and the EDS analysis of the Fe₂B phase

شکل 4 تصاویر میکروسکوپ الکترونی SEM از مقطع جوش نمونه جوشکاری شده با Fe-B-1 و آنالیز EDS از فاز Fe₂B مشخص شده

2-2-3- نمونه جوشکاری شده با سیم جوش Fe-B شامل فرایند دو پاس جوشکاری (Fe-B-2)

شکل 7 منطقه جوش حاصل از پاس دوم جوشکاری را نشان می دهد. همانطور که از تصویر پیداست فرایند پاس دوم جوشکاری منجر به ایجاد ترکیب نسبتاً متفاوتی نسبت به فرایند جوشکاری پاس اول شده است.

3-2-4- نمونه جوشکاری شده با سیم جوش Fe-B-C شامل فرایند یک پاس جوشکاری (Fe-B-C-1)

شکل 10 تصویر میکروسکوپ الکترونی از نمونه جوشکاری شده با سیم جوش Fe-B-C شامل فرایند یک پاس جوشکاری (Fe-B-C-1) را نشان می دهد. فرایند جوشکاری منجر به ایجاد جزایر پرلیتی و یوتکتیک α -Fe₂B بر اساس دیاگرام شکل 3 و دیاگرام آهن کربن می گردد. حضور فاز Fe₂B توسط آنالیز XRD در شکل 11 (الف) تایید می شود. همانطور که از تصویر 10 مشاهده می گردد یوتکتیک α -Fe₂B تصویر اثر انگشتی (لایه لایه) از لایه های متوالی α و Fe₂B می باشد. ساختار مشاهده شده را می توان بر اساس دیاگرام شکل 3 و دیاگرام آهن کربن به این صورت توضیح داد که با انجام فرایند انجماد ذوب با توجه به درصد بور و کربن موجود در آلیاژ، ابتدا خط انجماد از منطقه آستنیت عبور کرده و منجر به ایجاد آستنیت در داخل مذاب می گردد. با ادامه فرایند انجماد و رسیدن به خط یوتکتیک، مذاب به ترکیب یوتکتیک α -Fe₂B تبدیل شده و آستنیت به پرلیت تبدیل می گردد. شکل 12 شماتیک مکانیزم تشکیل جزایر پرلیتی و یوتکتیک α -Fe₂B را نشان می دهد.

3-2-5- نمونه جوشکاری شده با سیم جوش Fe-B-C شامل فرایند دو پاس جوشکاری (Fe-B-C-2)

شکل 13 تصویر میکروسکوپ الکترونی از مقطع نمونه جوشکاری شده با سیم جوش Fe-B-C شامل فرایند دو پاس جوشکاری (Fe-B-C-2) را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می گردد اعمال فرایند پاس دوم منجر به ایجاد ساختار متفاوتی نسبت به ساختار جوشکاری پاس اول شده است. همانطور که مشاهده می گردد فرایند جوشکاری منجر به ایجاد جزایر پرلیتی و یوتکتیک α -Fe₂B بر اساس دیاگرام شکل 3 و دیاگرام آهن کربن می گردد. حضور فاز Fe₂B توسط آنالیز XRD در شکل 11 (ب) تایید می شود. مقایسه تصاویر جوشکاری پاس اول در مقایسه با پاس دوم حضور مقادیر کمتری از پرلیت و مقادیر بیشتری از یوتکتیک α -Fe₂B را نشان می دهد.

3-2-6- نمونه جوشکاری شده با سیم جوش Fe-B-C شامل فرایند سه پاس جوشکاری (Fe-B-C-3)

شکل 14 تصویر میکروسکوپ الکترونی از مقطع نمونه جوشکاری شده با سیم جوش Fe-B-C شامل فرایند سه پاس جوشکاری (Fe-B-C-3) را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می گردد اعمال فرایند پاس سوم منجر به ایجاد ساختار متفاوتی نسبت به ساختار جوشکاری پاس اول و دوم شده است. فرایند جوشکاری پاس سوم منجر به ایجاد ذرات اولیه Fe₂B و یوتکتیک (Fe₂B - پرلیت) بر اساس دیاگرام شکل 3 و دیاگرام آهن کربن می گردد. حضور فاز Fe₂B توسط آنالیز XRD در شکل 11 (ج) تایید می شود. همچنین تصاویر شکل های 14 و 11 (ج) حاکی از حضور مقادیر بسیار کمی فاز FeB نیز می باشد که این فاز در اطراف فاز Fe₂B اولیه تشکیل می شود. این امر را می توان به دلیل افزایش مقدار بور در مذاب و نزدیک شدن بیشتر ترکیب آلیاژ به نقطه یوتکتیک دیاگرام فاز Fe-B دانست. این امر منجر به ایجاد آستنیت اولیه کمتر و در نتیجه پرلیت کمتر در فرایند انجماد خواهد شد که ساختاری با میزان پرلیت کمتر و یوتکتیک α -Fe₂B بیشتری را نسبت به جوشکاری پاس اول نشان می دهد.

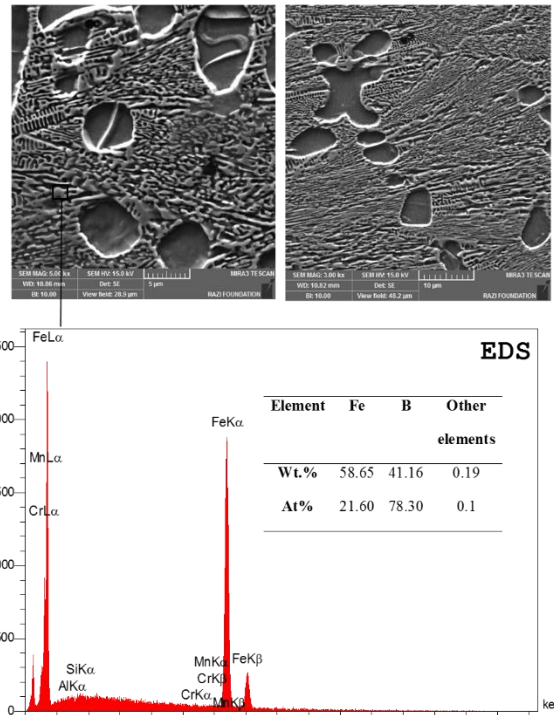


Fig. 7 SEM electron microscopy images of the welding vertical section of Fe-B-2 sample and the EDS analysis of the Fe₂B phase

شکل 7 تصاویر میکروسکوپ الکترونی SEM از مقطع عمودی جوش نمونه جوشکاری شده با Fe-B-2 و آنالیز EDS از فاز Fe₂B

3-2-3- نمونه جوشکاری شده با سیم جوش Fe-B شامل فرایند سه پاس جوشکاری (Fe-B-3)

شکل 8 تصویر میکروسکوپ الکترونی SEM از نمونه جوشکاری شده با سیم جوش Fe-B شامل فرایند سه پاس جوشکاری (Fe-B-3) را نشان می دهد. همانطور که از تصویر پیداست فرایند پاس سوم جوشکاری منجر به ایجاد ترکیب نسبتاً متفاوتی نسبت به فرایند جوشکاری پاس اول و دوم شده است. فرایند جوشکاری پاس سوم منجر به ایجاد ذرات اولیه Fe₂B و یوتکتیک α -Fe₂B بر اساس دیاگرام شکل 3 و دیاگرام آهن کربن می گردد. تصاویر ذرات اولیه Fe₂B و یوتکتیک حاصل از فرایند انجام جوش را می توان در عکس میکروسکوپ الکترونی شکل 8 مشاهده نمود. حضور فاز Fe₂B توسط آنالیز EDS و XRD در شکل های 8 و 5 (ج) تایید می شود. همچنین تصاویر شکل های 8 و 5 (ج)، حاکی از حضور مقادیر بسیار کمی فاز FeB نیز می باشد که این فاز در اطراف فاز Fe₂B اولیه تشکیل می شود. مکانیزم تشکیل Fe₂B اولیه و FeB را می توان به صورت زیر توضیح داد. تشکیل Fe₂B اولیه را می توان به دلیل افزایش میزان بور و انجماد غیر تعادلی آلیاژ دانست. بدین صورت که افزایش میزان بور نسبت به پاس های اول و دوم جوشکاری منجر به افزایش بور شده و انجماد غیر تعادلی موجب عبور خط انجماد از ناحیه هایپر یوتکتیک آلیاژ گردیده که این امر تولید Fe₂B اولیه را به همراه خواهد داشت. ادامه فرایند انجماد منجر به ایجاد یوتکتیک α -Fe₂B در کنار Fe₂B اولیه در ساختار خواهد شد. Fe₂B اولیه به صورت ستونی شکل در تصاویر مشاهده می گردد. حضور ترکیب FeB را نیز می توان به دلیل جدایش عنصر بور در جوشکاری در طی انجماد دانست. شماتیک ساختار حاصل از فرایند جوشکاری در پاس سوم در شکل 9 نشان داده شده است.

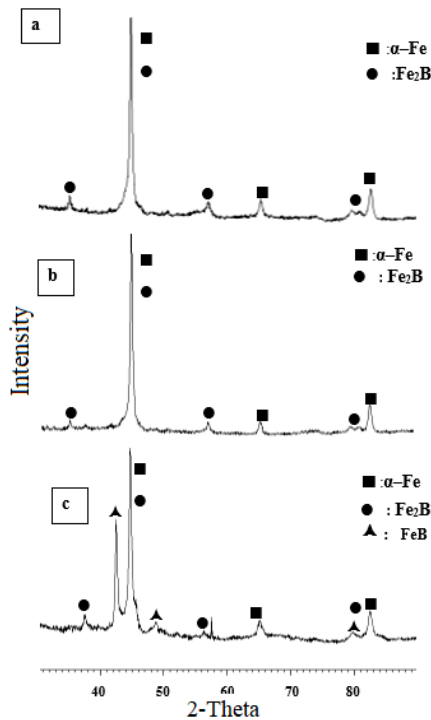


Fig. 11 X-ray diffraction pattern (XRD) from samples a) Fe-B-C-1, b) Fe-B-C-2 and c) Fe-B-C-3

شکل 11 الگوی پراش پرتو ایکس (XRD) از نمونه های (a) Fe-B-C-1 (b) Fe-B-C-2 و (c) Fe-B-C-3

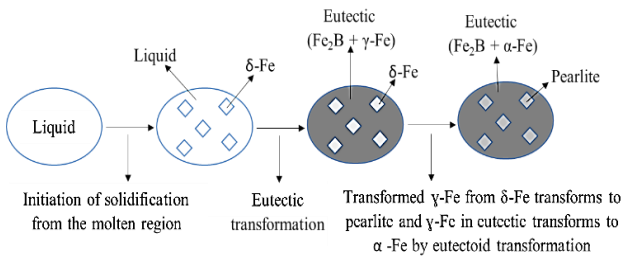


Fig. 12 Schematic of the formation of phases formed in the Fe-B-C-1 sample

شکل 12 شماتیک مکانیزم تشکیل فازهای تشکیل شده در نمونه Fe-B-C-1 تشکیل Fe_2B اولیه را می توان به دلیل افزایش میزان بور و انجماد غیر تعادلی الیاژ دانست. بدین صورت که افزایش میزان بور نسبت به پاس های اول و دوم جوشکاری منجر به افزایش بور شده و انجماد غیر تعادلی موجب عبور خط انجماد از ناحیه هایپر یوتکتیک الیاژ گردیده که این امر تولید Fe_2B اولیه را به همراه خواهد داشت. ادامه فرایند انجماد منجر به ایجاد یوتکتیک (Fe_2B - پیرلیت) در کنار Fe_2B اولیه پرویوتکتیکی در ساختار خواهد شد. Fe_2B اولیه به صورت ستونی شکل در تصاویر مشاهده می گردد که تصاویر مقطع عرضی، سطح مربعی آن را نشان می دهد. حضور ترکیب FeB را نیز می توان به دلیل جدایش عنصر بور در جوشکاری در طی انجماد دانست. شماتیک ساختار حاصل از فرایند جوشکاری در پاس سوم در شکل 15 نشان داده شده است.

3-3- سختی

شکل 16 نتایج حاصل از سختی سنجی نمونه های مختلف را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می گردد افزایش پاس جوشکاری منجر به افزایش سختی نمونه های مختلف می گردد. این امر را در نمونه های مختلف می

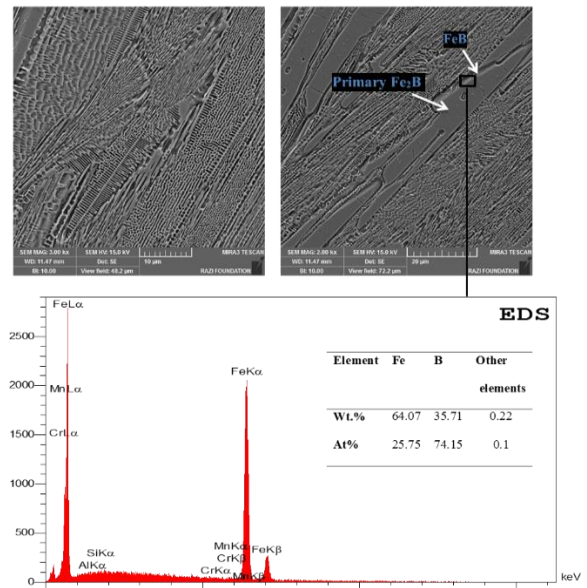


Fig. 8 Images of SEM electron microscopy from the vertical section of the sample welded with Fe-B-3 and EDS analysis of iron boride phases in the Fe-B-3 sample

شکل 8 تصاویر میکروسکوپ الکترونی SEM از مقطع عمودی جوش نمونه جوشکاری شده با Fe-B-3 و آنالیز EDS از فازهای بوراید آهن در نمونه Fe-B-3

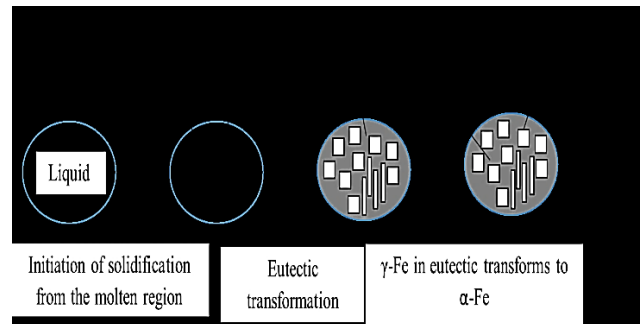


Fig. 9 Schematic illustration of the phase transformations in Fe-B-3 sample

شکل 9 شماتیک مکانیزم تشکیل فازهای تشکیل شده در نمونه Fe-B-3

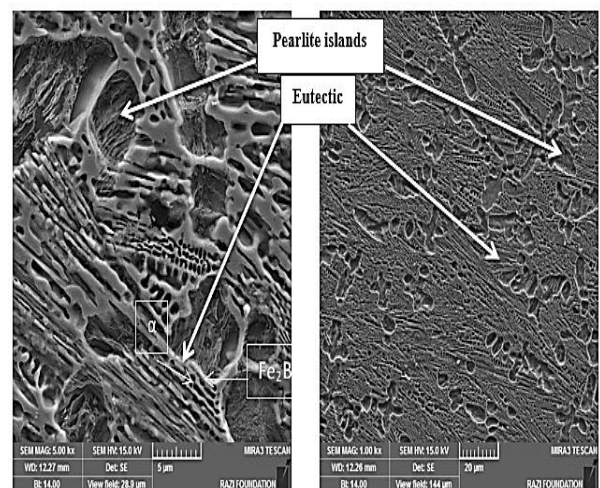


Fig. 10 Images of SEM electron microscopy from the welding section of Fe-B-C-1 sample

شکل 10 تصاویر میکروسکوپ الکترونی SEM از مقطع جوش نمونه جوشکاری شده با Fe-B-C-1

جوش Fe-B در نمونه Fe-B-1 و در سیم جوش Fe-B-C در نمونه Fe-B-C-1، به دلیل کمتر بودن میزان بور (جدول 3) می توان مشاهده کرد. بیشتر بودن سختی نمونه های سیم جوش Fe-B-C نسبت به نمونه های سیم جوش Fe-B را می توان به نحوه انجماد جوش (شکل 9 و 15) و تشکیل پرلیت (شکل 14) به دلیل میزان کربن بیشتر در نمونه های سیم جوش Fe-B-C نسبت به نمونه های سیم جوش Fe-B دانست.

4- نتیجه گیری

در این پژوهش، به روش جوشکاری قوس باز و با استفاده از پودر فروبور به عنوان منبع بور، لایه روکش سخت پایه Fe-B و Fe-B-C بر روی فولاد ساده کربنی اعمال شد و اثر میزان عنصر بور و افزودن عنصر کربن بر ریزساختار و سختی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل گردید:

1- با افزایش میزان بور ریزساختار در نمونه های سیم جوش Fe-B، شامل یوتکتیک (α -Fe₂B) و ذرات اولیه Fe₂B و مقدار کمی FeB در اطراف ذرات ستونی شکل Fe₂B می باشد.

2- با افزایش میزان بور ریزساختار در نمونه های سیم جوش Fe-B-C، شامل یوتکتیک (P-Fe₂B - پرلیت) و ذرات اولیه Fe₂B و مقدار کمی FeB در اطراف ذرات ستونی شکل Fe₂B می باشد.

3- در هر دو سیم جوش Fe-B و Fe-B-C با افزایش میزان بور، فاز Fe₂B اولیه بیشتر شده و در نتیجه سختی افزایش می یابد.

4- بیشتر بودن سختی نمونه های سیم جوش Fe-B-C نسبت به نمونه های سیم جوش Fe-B را می توان به نحوه انجماد جوش و تشکیل پرلیت به دلیل میزان کربن بیشتر در نمونه های سیم جوش Fe-B-C نسبت به نمونه های سیم جوش Fe-B دانست.

5- مراجع

- [1] Gou, J., Wang, Y., Sun, J., Li, X., "Bending strength and wear behavior of Fe-Cr-C-B hardfacing alloys with and without rare earth oxide nanoparticles", Surface & Coatings Technology, Vol. 311, PP. 113-126, 2017.
- [2] Wang, Y., Gou, J., Chu, R., Zhen, D., Liu, S., "The effect of nano-additives containing rare earth oxides on sliding wear behavior of high chromium cast iron hardfacing alloys", Tribology International, Vol. 103, PP.102-112, 2016.
- [3] Rovatti, L., Lemke, J.N., Emami, A., Stejskal, O., and Vedani, M., "Effects of V Addition on Microstructure and Hardness of Fe-C-B-Ni-V Hardfacing Alloys Cast on Steel Substrates", Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 24, No. 12, PP. 4755-4763, 2015.
- [4] Yuksel N., Sahin S., "Wear behavior-hardness-microstructure relation of Fe-Cr-C and Fe-Cr-C-B based hardfacing alloys", Materials and Design, Vol. 58, PP. 491-498, 2014.
- [5] Gou, J., Lu, P., Wang, Y., Liu, S., Zou, Z., "Effect of nano-additives on microstructure, mechanical properties and wear behaviour of Fe-Cr-B hardfacing alloy", Applied Surface Science, Vol. 360, PP. 849-857, 2016.
- [6] Lin, H., Ying, L., Jun, L., Binghong, L., "Microstructure and Mechanical Properties for TIG Welding Joint of High Boron Fe-Ti-B Alloy", Rare Metal Materials and Engineering, Vol. 43, No. 2, PP.0283-0286, 2014.
- [7] Sabet, H., Khierandish, Sh., Mirdamadi, Sh., Goodarzi, M., "The Microstructure and Abrasive Wear Resistance of Fe-Cr-C Hardfacing Alloys with the Composition of Hypoeutectic, Eutectic, and Hypereutectic at Cr/C=6", Tribology Letters, Vol. 44, PP. 237-245, 2011.
- [8] Correa, EO., Alcántara, NG., Valeriano, LC., Barbedo, ND., Chaves, RR., "The effect of microstructure on abrasive wear of a Fe-Cr-C-Nb hardfacing alloy deposited by the open arc welding process", Surface & Coatings Technology, Vol. 276, PP. 479-484, 2015.

توان به دلیل افزایش بور در اثر افزایش تعداد پاس های جوشکاری دانست. در هر دو سیم جوش Fe-B و Fe-B-C با افزایش میزان بور، فاز Fe₂B اولیه بیشتر شده و در نتیجه سختی افزایش می یابد. پس کمترین عدد سختی را در سیم

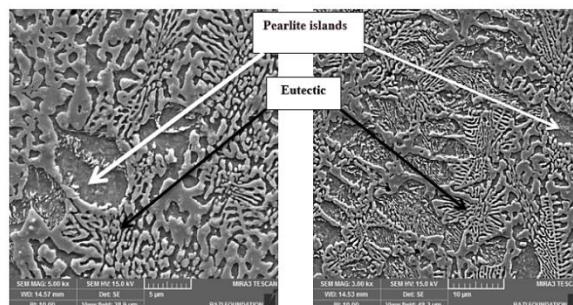


Fig. 13 Images of SEM electron microscopy from the welding section of Fe-B-C-2 sample

شکل 13 تصاویر میکروسکوپ الکترونی SEM از مقطع جوش نمونه جوشکاری شده با Fe-B-C-2

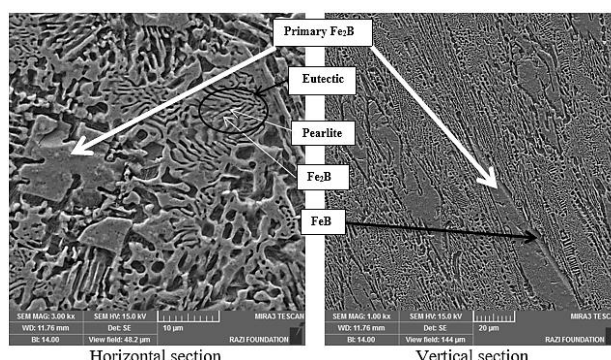


Fig. 14 Samples of SEM electron microscopy images from the horizontal and vertical sections of the sample welded with Fe-B-C-3

شکل 14 تصاویر میکروسکوپ الکترونی SEM از مقطع افقی و عمودی جوش نمونه جوشکاری شده با Fe-B-C-3

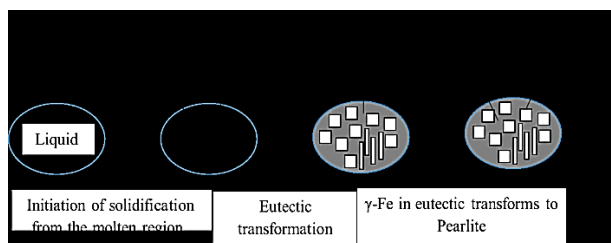


Fig. 15 Schematic illustration of the phase transformations in Fe-B-C-3 sample

شکل 15 شماتیک مکانیزم تشکیل فازهای تشکیل شده در نمونه Fe-B-C-3

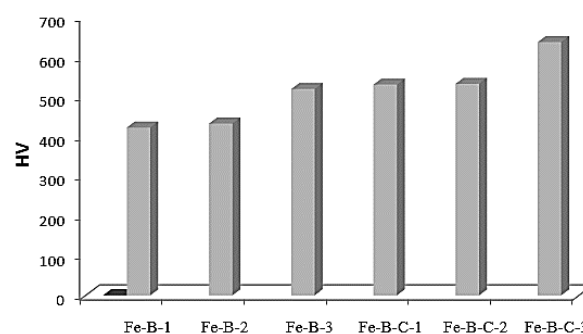


Fig. 16 Hardness test results

شکل 16 نتایج سختی سنجی نمونه ها

- [9] Eroglu, M., "Boride coatings on steel using shielded metal arc welding electrode: Microstructure and hardness", *Surface & Coatings Technology*, Vol. 203, PP. 2229–2235, 2009.
- [10] Gou, J., Wang, Y., Sun, Z., Li, X., "Study of work function and dry sliding wear behavior of Fe-based hardfacing alloys with and without nano rare earth oxides", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 713, PP. 255-265, 2017.
- [11] Liu, D., Liu, R., Wei, Y., "Effects of titanium additive on microstructure and wear performance of iron-based slag-free self-shielded flux-cored wire", *Surface & Coatings Technology*, Vol. 207, PP. 579–586, 2012.
- [12] Kim, JH., Ko, KH., Noh, SD., Kim, GG., Kim, SJ., "The effect of boron on the abrasive wear behavior of austenitic Fe-based hardfacing alloys", *Wear*, Vol. 267, PP. 1415–1419, 2009.
- [13] Huang, Z., Xing, J., Lv, Li., "Effect of tungsten addition on the toughness and hardness of Fe2B in wear-resistant Fe–B–C cast alloy", *Materials Characterization*, Vol. 75, PP. 63-68, 2013.
- [14] Venugopal, K., Agrwal, M., "Evaluation of arc sprayed coatings for erosion protection of tubes in atmospheric fluidized bed combustion (AFBC) boilers", *Wear*, Vol. 264, PP. 139–145, 2008.
- [15] Bourthis, L., Papaefthymiou, S., Papadimitriou, GD., "Plasma transferred arc boriding of a low carbon steel: microstructure and wear properties", *Applied surface science*, Vol. 200, PP. 203-218, 2002.