

تعیین مقدار بهینه عنصر بور موثر بر انرژی ضربه در دماهای پایین فلز جوش فولاد ساده کربنی

جوشکاری شده به روش SAW

شمس الدین شفیعی نیا^{۱*}، شمس الدین میردامادی^۲، حامد ثابت^۳ و سید رضا امیرآبادی زاده^۴

چکیده

این پژوهش بمنظور تعیین مقدار بهینه عنصر بور موثر بر انرژی ضربه در دماهای پایین فلز جوش فولاد ساده کربنی جوشکاری شده به روش زیرپودری انجام شده است. برای این منظور، ورق‌هایی از جنس فولاد ST37-2 به ابعاد $200 \times 150 \times 10$ میلی متر تهیه و عملیات جوشکاری به روش زیر پودری با سیم جوش S2/50-12 به قطر ۴ میلی متر انجام گردید و عنصر آلیاژی بور به صورت اکسید بور از راه افزودن به پودر فلاکس به فلز جوش انتقال داده شد. پس از جوشکاری نمونه‌هایی تهیه شد و سپس بررسی ریز ساختار به وسیله میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی و آزمون‌های ضربه و میکروسختی روی نمونه های فلز جوش انجام گردید. نتایج آنالیز شیمیایی نمونه‌ها حضور ۲۰، ۳۰، ۶۰، ۷۰ و ۱۱۰ ppm بور را در ۵ نمونه متفاوت از لحاظ مقدار بور اولیه تایید کرد. بررسی ریز ساختاری نمونه ها به کمک میکروسکوپ نوری افزایش فریت سوزنی، کاهش فریت ویدمن اشتاتن و فریت چندوجهی و فریت مرزدانه ای را در حضور ۲۰ ppm بور مشخص کردند، در صورتی که با افزایش بور از ۲۰ تا ۱۱۰ ppm غالب ساختار از فریت های ویدمن اشتاتن و چند وجهی تشکیل شده بودند. با انجام آزمون میکروسختی مشخص گردید که نمونه حاوی ۲۰ ppm بور با ساختار غالباً فریت سوزنی کمترین سختی را نسبت به سایر نمونه ها داراست. نتایج آزمون ضربه بهترین مقاومت به ضربه را برای نمونه حاوی ۲۰ ppm بور در سه دمای: محیط، صفر و ۲۰- درجه سانتی گراد نشان داد و در باقی نمونه‌ها با افزایش بور کاهش انرژی ضربه نسبت به نمونه خام مشاهده گردید. هم‌چنین، بررسی های شکست نگاری نمونه‌های ضربه مشخص کرد که در دمای ۲۰- درجه سانتی گراد سهم شکست ترد برای نمونه حاوی ۲۰ ppm بور با بالاترین انرژی ضربه ۱۰ درصد و برای نمونه حاوی ۱۱۰ ppm بور با کمترین انرژی ضربه حدود ۵۰ درصد بوده است.

واژه های کلیدی: فولاد ساده کربنی، بور، چقرمگی ضربه فلز جوش، فریت سوزنی.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی جوشکاری- دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات

۲- استاد دانشکده مهندسی مواد دانشگاه علم و صنعت ایران.

۳- استادیار گروه مهندسی مواد و متالورژی دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج.

۴- عضو هیئت علمی گروه مهندسی مکانیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب

*- نویسنده مسئول مقاله: sshafinia@yahoo.com

پیشگفتار

بهبود خواص سرویس دهی یک سازه جوشکاری شده به سه عامل فلز پایه، منطقه متأثر از حرارت و فلز جوش بستگی دارد. فلز جوش در جوشکاری زیر پودری که یک روش جوشکاری با حرارت ورودی بالاست، از یک فعل و انفعال شیمیایی بین فلز پرکننده، فلز پایه و فلاکس تولید می‌شود. لذا، توسعه سیم و فلاکس جهت مطابقت خواص فلز جوش با فلز پایه امری ضروری می‌باشد [۱]. حرارت ورودی بالا و سرعت سرد شدن نسبتاً آهسته، موجب افزایش زمان تحول آستنیت به فریت و افزایش درصد حجمی فاز فریت خواهد شد [۲]. بسیاری از پژوهش‌های انجام شده در دهه گذشته مشخص می‌کند که وجود فریت‌های سوزنی در ریز ساختار، استحکام و چقرمگی فلز جوش را در فولادهای ساده کربنی بهبود می‌بخشد. فریت سوزنی بسیار ریزدانه بوده و به دلیل تراکم نابه‌جایی‌ها و قابلیت انعطاف‌پذیری، چقرمگی بالایی در فلز جوش ایجاد می‌کند. تئوری‌های گوناگونی در توجیه چگونگی تشکیل فریت سوزنی وجود دارد برای مثال وجود آخال‌های غیرفلزی درون دانه‌های حاوی اکسیژن، میانگین سرعت سرد شدن ۱۰ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد بر ثانیه در محدوده دمایی ۵۰ تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد، به همراه ترکیب شیمیایی مناسب حاوی عناصر آلیاژی مانند بور و تیتانیوم، سبب تشکیل این فاز به عنوان ریز ساختار غالب در فلز جوش می‌شود [۳-۷]. در مورد اثر بور بر خواص مکانیکی فلز جوش فولاد ساده کربنی به ویژه بهبود انرژی ضربه، گزارش‌های مثبتی وجود دارد، برای نمونه، آه^۱ و همکارانش [۸] اثر بور و تیتانیوم را بر خواص مکانیکی فلز جوش فولاد ساده کربنی جوشکاری شده به روش FCAW^۲ بررسی کردند. نتایج بررسی آن‌ها مشخص کرد که با افزایش بور تا ۰/۰۱۱ درصد وزنی تا حدود ۸۰ درصد فریت سوزنی قابل دستیابی است که در این شرایط، سختی تا ۷۰ راکول B افزایش می‌یابد و بیش‌ترین مقادیر چقرمگی شکست در دماهای زیر صفر را برای فلز جوش به همراه دارد. ویجری^۳ [۹] در پژوهش‌های خود بهبود انرژی

ضربه فلز جوش جوشکاری شده به روش جوشکاری زیرپودری را در حضور ۰/۰۵ درصد وزنی عنصر بور در دماهای زیر صفر گزارش کرده است. هم‌چنین، لی^۴ [۱۰] افزایش سختی فلز جوش جوشکاری شده به روش FCAW تا ۲۳۵ ویکرز را در حضور ۱۱۰ ppm بور مشاهده کرده است. کوشیو^۵ و همکارانش [۱۱] اثر حضور بور در پوشش الکترود در روش SMAW^۶ بر چقرمگی ضربه و مقدار بازشدگی دهانه ترک^۷ را بررسی کردند. در بررسی آن‌ها مشخص شد که کم‌ترین مقدار بازشدگی دهانه ترک در حضور ۵۰ ppm بور برابر ۱/۵ میلی‌متر بوده و بهترین انرژی ضربه در دمای ۵۰- درجه سانتی‌گراد و در حضور ppm ۴۰ بور برابر ۱۳۲ ژول بدست آمده است. رن^۸ [۷] و همکارانش در پژوهش‌هایشان اثر ترکیب شیمیایی سیم جوش بر چقرمگی ضربه فلز جوش جوشکاری شده به روش جوشکاری SAW را بررسی کردند و گزارش دادند که اگر مقدار عنصر آلیاژی بور کنترل شود، انرژی ضربه در دماهای پایین بهبود می‌یابد. آن‌ها در توجیح این موضوع مدعی شدند که بور تشکیل فریت پرویوتکتوئید و بینیت را محدود نموده و کسر حجمی فریت سوزنی را افزایش می‌دهد. راویچ^۹ [۱۲] طی مطالعه‌ای که روی اثر بور بر چقرمگی ضربه در دمای زیر صفر فلز جوش جوشکاری شده به روش SMAW داشتند، به انرژی ضربه ۱۵۰ ژول در دمای ۳۰- درجه سانتی‌گراد برای فلز جوش حاوی ppm ۴۰ بور دست یافت. دولتیان^{۱۰} و هین^{۱۱} [۱۳] نیز اثر بور بر تصحیح اندازه دانه فلز جوش فولاد ساده کربنی جوشکاری شده به روش GTAW^{۱۲} و GMAW^{۱۳} را بررسی کردند و گزارش دادند که بور در مقادیر بیش از ۰/۰۰۶ درصد وزنی قدرت بالایی در تصحیح اندازه دانه‌های فلز جوش فولاد ساده کربنی دارد. در همان راستا این پژوهش‌ها بمنظور تعیین مقدار بهینه عنصر بور موثر بر

⁴ -Lee

⁵ -Koshio

⁶ -Shielded Metal Arc Welding

⁷ -Crack Opening Displacement

⁸ -Ren

⁹ -Ravich

¹⁰ -Devletian

¹¹ - Heine

¹² - Gas Tungsten Arc Welding

¹³ - Gas Metal Arc Welding

¹ -Oh

² -Flux Cored Arc Welding

³ -Widjery

آزمون میکروسختی نیرو برابر ۲۰۰ گرم و زمان ۱۵ ثانیه روی نمونه های گوناگون در نظر گرفته شد. نمونه های آزمون ضربه چارپی بر اساس استاندارد AWS B4 که به صورت شماتیک در شکل ۲ نشان داده شده است، تهیه و برای هر دما ۵ نمونه در نظر گرفته شد و در دماهای محیط، صفر (۰) و (-۲۰) درجه سانتی گراد آزمون مربوطه روی نمونه ها انجام شد. با هدف بررسی وضعیت شکست نمونه های ضربه، مقاطع شکست به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل LEO 440i تحت ولتاژ ۱۰ کیلوولت و مود تصویربرداری الکترون های ثانویه مورد مطالعه قرار گرفت. حرارت ورودی جوشکاری با استفاده از رابطه (۱) [۱۵] تعیین شد:

$$Q_w = kQ_a = k60.u.I/V \quad (j/mm) \quad (1)$$

که در این رابطه:

V: اختلاف پتانسیل بر حسب ولت

I: شدت جریان جوشکاری بر حسب آمپر

u: سرعت جوشکاری بر حسب mm/s: راندمان قوس

الکتریکی = ۰/۹۵ می باشد. هم چنین، جهت تعیین نرخ

سرد شدن از رابطه (۲) [۱۵] استفاده شد:

$$\left[\frac{1}{500 - T_0} - \frac{1}{800 - T_0} \right] t_{8/5} = \frac{Q_w}{2\pi\lambda} \Delta \quad (2)$$

که در این رابطه:

T_0 [°C]: درجه حرارت فلز پایه پیش از جوشکاری

(پیش گرم، دمای بین پاسی)

Q_w [kJ/mm]: انرژی جوشکاری λ : ضریب

انتقال حرارت می باشد.

شرایط جوشکاری ورق آزمایش بر اساس استاندارد AWS A5.17 و شماتیک قطعه آزمون جهت آنالیز شیمیایی فلز جوش به ترتیب در جدول ۵ و شکل ۱ آمده است.

نتایج و بحث

آنالیز شیمیایی

جدول ۷ نتایج آنالیز شیمیایی نمونه های گوناگون را نشان می دهد. با توجه به نتایج جدول ۷، مقدار بور جذب شده در فلز جوش نمونه های گوناگون و هم چنین، مقدار اولیه بور موجود در فلاکس (در جدول ۶)، شکل ۳ رسم گردید. همان گونه که از شکل ۳ مشخص است، با افزایش

انرژی ضربه در دماهای پایین فلز جوش فولاد ساده کربنی جوشکاری شده به روش SAW انجام شده است.

روش پژوهش

جهت انجام آزمون ها ورق هایی از فولاد ST37-2 با کد ۱/۰۰۳۷ به ابعاد ۲۰۰×۱۵۰×۱۰ میلی متر تهیه شد. ترکیب شیمیایی فولاد مورد نظر تعیین شده به روش اسپکتروسکوپی نشر نوری^۱ OES و خواص مکانیکی آن بر اساس کتاب کلید فولاد [۱۴] به ترتیب در جدول ۱ و ۲ آمده است. عملیات جوشکاری به روش زیرپودری با سیم جوش S2/50-12 به قطر ۴ میلی متر و پودر جوشکاری AMA OP122 بر اساس استاندارد AWS A5.17 انجام شد. ترکیب شیمیایی سیم و پودر جوشکاری به ترتیب در جداول ۳ و ۴ آمده است.

عنصر آلیاژی بور به صورت اکسید بور از راه افزودن به پودر جوشکاری، به فلز جوش انتقال داده شد. ۵ نوع پودر متفاوت از لحاظ مقدار بور اولیه به صورت ارائه شده در جدول ۶ تهیه شد. پس از جوشکاری نمونه هایی جهت انجام آزمون های آنالیز شیمیایی، SEM, OM، میکروسختی و ضربه از فلز جوش تهیه شد. آنالیز شیمیایی به روش طیف سنجی جذب اتمی^۲ AAS روی فلز جوش نمونه های گوناگون انجام شد. هم چنین، برای تعیین دقیق تر مقدار بور آزمایش ICP^۳ نیز انجام گرفت. پس از آماده سازی سطح نمونه ها ریزساختار نمونه ها به کمک میکروسکوپ نوری مدل OLYMPUS BX51M مورد مطالعه قرار گرفت. هم چنین، در ادامه درصد آخال های هر نمونه به کمک نرم افزار آنالیز تصویری^۴ تعیین شدند. پس از آن، جهت بررسی دقیق تر فازها از میکروسکوپ الکترونی روبشی^۵ مدل VEGA/TESCAN با ولتاژ کاری ۱۵ کیلوولت و مود تصویربرداری الکترون های ثانویه^۶ استفاده شد. هم چنین، نقشه توزیع عناصر آلیاژی^۷ برای تشخیص مناسب تر توزیع عناصر آلیاژی انجام گرفت. در

¹- Optical Emission Spectroscopy

²- Atomic Absorption Spectrometry

³-Inductively Coupled Plasma

⁴-Image Analyzer

⁵-SEM: Scanning Electron Microscope

⁶-Secondary Electron Detector

⁷-Map Elements

ریزساختار میکروسکوپی

جدول ۸ شامل داده‌های کاملی از نمونه‌ها و ریزساختار آن‌ها به نمایش درآمده است. شکل ۴ و ۵ نیز به ترتیب تصویر میکروسکوپ نوری و تصویر SEM به همراه نقشه توزیع عنصر آلیاژی بور را نمایش می‌دهد. با توجه به جدول ۹ در تمامی نمونه‌ها فازهای: فریت ویدمن اشتاتن، فریت سوزنی، فریت مرزدانه‌ای، فریت چندوجهی و آخال‌ها با کسر حجمی متفاوت قابل مشاهده اند.

مقدار بور اولیه در فلاکس جوشکاری، مقدار بور وارد شده به فلز جوش نیز افزایش می‌یابد. با توجه به شکل ۳ و به کمک نرم افزار Excel معادله خط به صورت: $y = 0.0003x^2 + 0.0005x + 0.0012$ تعیین شد که در این رابطه y ، مقدار بور وارد شده به فلز جوش برحسب درصد وزنی و x ، مقدار بور اولیه در فلاکس جوشکاری برحسب درصد وزنی می باشد.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی (درصد وزنی) فولاد ST37-2 محاسبه شده به روش OES.

Ni	Cr	Cu	Mo	S	P	Mn	Si	C	Fe
۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۰۳	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۲۵	۰/۰۱	۰/۰۳	۹۹/۶۰۷

جدول ۲- خواص مکانیکی فولاد ST37-2 [۱۴].

کد: 1.0037	طبقه بندی: ST37-2	استاندارد: DIN17100
درصد تغییر طول: ۲۳٪	استحکام کششی: ۴۱۰ Mpa	استحکام تسلیم: ۲۴۰ Mpa

جدول ۳- ترکیب شیمیایی پودر فلاکس [۲۵].

AMA OP122			
EN760 : SA FB 1 65 AC HP 5	Grain size DIN 32 522 : 2-20	ضریب قلیائیت: ۱/۷	
SiO ₂ +TiO ₂	CaO+MgO	Al ₂ O ₃ +MnO	CaF ₂
٪۲۰	٪۳۰	٪۲۵	٪۲۰

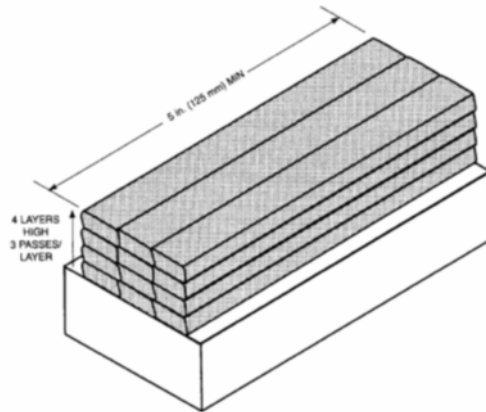
جدول ۴- مشخصات سیم جوش [۲۵].

Mn	Si	C	DIN EN 760	کد شناسایی آما	قطر سیم	مشخصات سیم
۱	<۰/۱۵	۰/۱	S2	۵۰-۱۲	۴ میلی متر	جوش

جدول ۵- شرایط جوشکاری ورق آزمایش بر اساس استاندارد AWS A5.17.

۵۸۰±۲۰	شدت جریان A
۲۹±۱	ولتاژ V
۵۵۵	سرعت پیشروی mm/min
DCEP	جریان
۷/۰±۰/۵	سرعت تغذیه سیم mm/sec
۱۵۰±۵۰ ^{oc}	دمای بین پاسی ^۱
فولاد ST37-2	فلز پایه

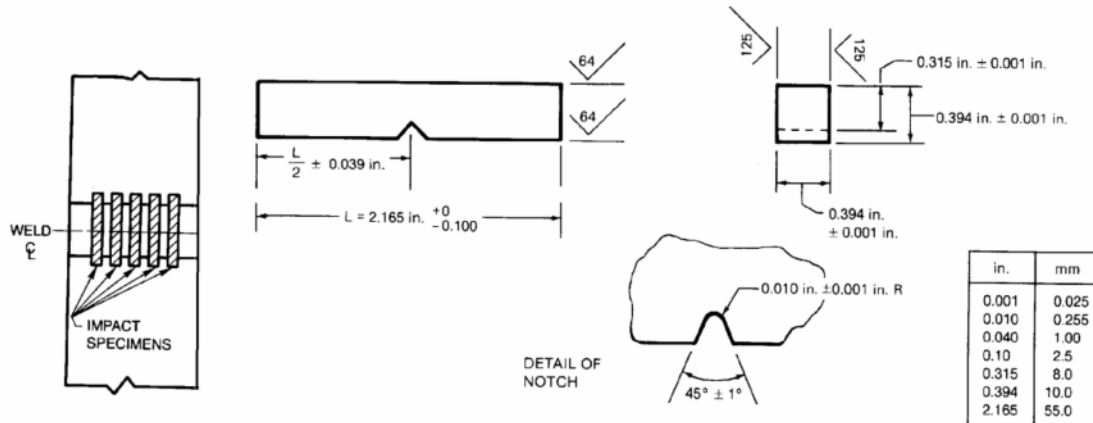
¹ - Interpass Temperature



شکل ۱- شماتیک قطعه آزمون جهت آنالیز شیمیایی فلز جوش.

جدول ۶- نام گذاری نمونه ها و مقدار بور اولیه پودر جوشکاری.

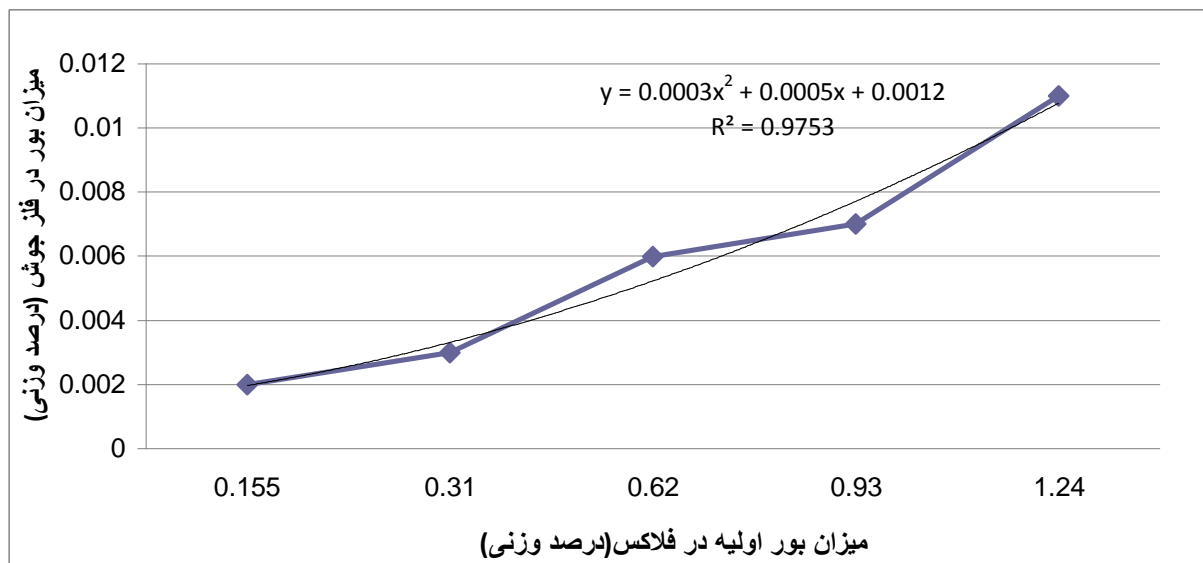
B5	B4	B3	B2	B1	B0	کد نمونه
۴	۳	۲	۱	۰/۵	۰	مقدار پودر اکسید بور اولیه افزوده (درصد وزنی)
۱/۲۴	۰/۹۳	۰/۶۲	۰/۳۱	۰/۱۵۵	۰	مقدار بور اولیه پودر جوشکاری محاسبه شده به روش استوکیومیتری (درصد وزنی)



شکل ۲- شماتیک نمونه ضربه چارپی و ابعاد آن بر اساس استاندارد AWS B4.0.

جدول ۷- ترکیب شیمیایی نمونه‌های گوناگون (درصد وزنی).

Ni	Cr	Ti	Mo	S	P	Mn	Si	B	C	Fe	عنصر
۰/۰۱۰	۰/۰۵۰	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲	۰/۰۱۰	۰/۰۲۰	۱/۲۳۰	۰/۳۴۰	—	۰/۰۵۰	۹۸/۲۸۰	B0
۰/۰۴۰	۰/۰۵۰	۰/۰۰۳	۰/۰۰۳	۰/۰۱۱	۰/۰۲۱	۱/۱۸۰	۰/۳۱۰	۰/۰۰۲	۰/۰۵۰	۹۸/۳۳۰	B1
۰/۰۲۰	۰/۰۵۰	۰/۰۰۳	۰/۰۰۲	۰/۰۱۱	۰/۰۲۱	۱/۲۱۰	۰/۳۱۰	۰/۰۰۳	۰/۰۵۰	۹۸/۳۲۰	B2
۰/۰۲۰	۰/۰۶۰	۰/۰۰۲	۰/۰۰۴	۰/۰۱۰	۰/۰۱۹	۱/۲۰۰	۰/۳۲۰	۰/۰۰۶	۰/۰۵۰	۹۸/۳۰۹	B3
۰/۰۲۰	۰/۰۴۰	—	—	۰/۰۱۰	۰/۰۲۳	۱/۲۰۰	۰/۳۲۰	۰/۰۰۷	۰/۰۵۰	۹۸/۳۳۰	B4
۰/۰۱۰	۰/۰۵۰	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲	۰/۰۱۰	۰/۰۱۹	۱/۱۵۰	۰/۳۲۰	۰/۰۱۱	۰/۰۵۰	۹۸/۳۷۶	B5



شکل ۳- نمودار مقدار بور در فلز جوش به صورت تابعی از مقدار بور اولیه در فلاکس جوشکاری بر حسب درصد وزنی.

جدول ۸- داده های مربوط به درصد فازها در هر نمونه .

درصد فازها					درصد وزنی بور در فلز جوش	درصد وزنی بور در فلاکس	نمونه
ناخالصی ^۵ I	فریت اولیه چندوجهی ^۴ PF	فریت ویدمنشتاتن ^۳ WF	فریت اولیه مرزدانه ای ^۲ GF	فریت سوزنی ^۱ AF			
۱	۲۱	۱۲	۳۵	۳۱	۰	۰	B0
۱	۱۸	۶	۲۴	۵۱	۰/۰۰۲	۰/۱۵۵	B1
۱	۲۶	۱۸	۲۷	۲۸	۰/۰۰۳	۰/۳۱	B2
۱	۲۵	۲۱	۲۸	۲۵	۰/۰۰۶	۰/۶۲	B3
۱	۲۶	۲۳	۲۸	۲۲	۰/۰۰۷	۰/۹۳	B4
۱	۳۰	۲۴	۲۴	۲۱	۰/۰۱۱	۱/۲۴	B5

جدول ۹- نتایج آزمون میکرو سختی.

B5	B4	B3	B2	B1	B0	نمونه
-۳۹۶-۳۹۷	-۳۸۶-۳۹۰	-۳۸۰-۳۸۵	-۳۶۷-۳۷۶	-۳۴۴-۳۶۶	-۳۷۱-۳۷۶	سختی ویکرز
۳۹۳-۳۹۴	۳۹۱-۳۸۹	۳۷۸-۳۸۱	۳۸۶-۳۶۳	۳۶۴-۳۵۸	۳۶۵-۳۶۸	(۴ مرحله)
۳۹۵	۳۸۹	۳۸۱	۳۷۳	۳۵۸	۳۷۰	میانگین

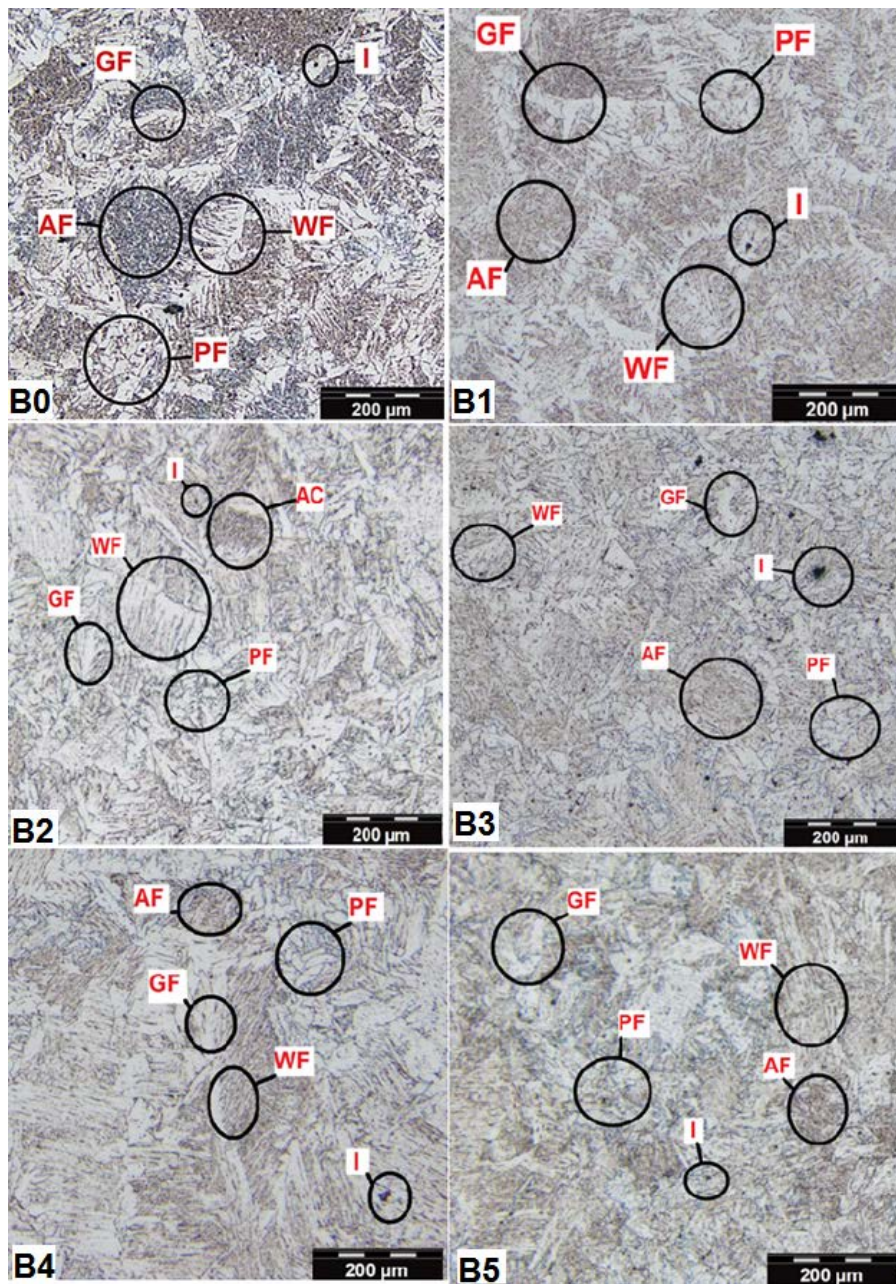
¹ -Acicular Ferrite

² - Grainbondery Primery Ferrite

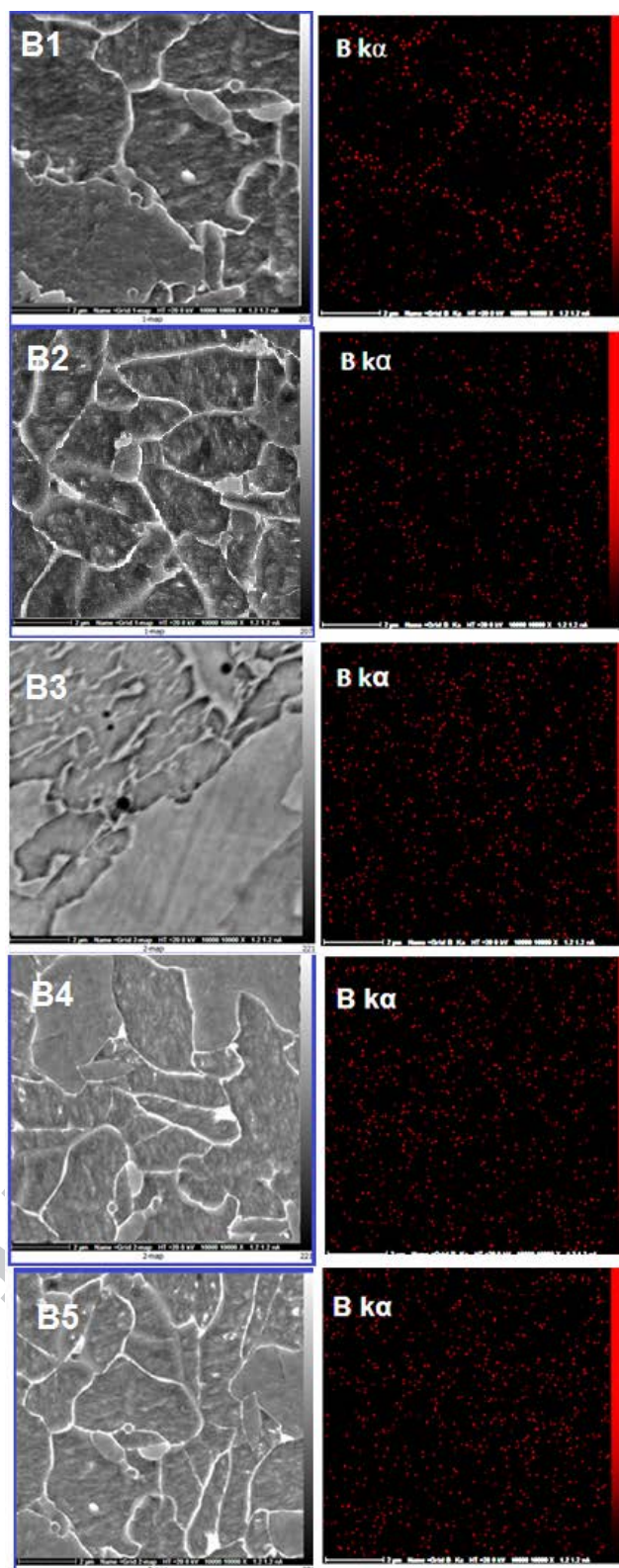
³ -Widmenstater Ferrite

⁴ - Polygonal Primery Ferrite

⁵ -Inclusion



شکل ۴- تصویر میکروسکوپی نوری نمونه B0 - AF: فریت سوزنی، GF: فریت مرز دانه ای، PF: فریت چند وجهی، WF: فریتویدمن اشتاتن، I: ناخالصی.



شکل ۵- تصویر SEM ریزساختار به همراه نقشه توزیع عنصر آلیاژی بور.

فازهای فریت سوزنی و فریت مرزدانه ای با کسر حجمی تقریباً برابرند. در این نمونه تنها عامل موثر بر تغییرات

همان‌گونه که در شکل ۴ برای نمونه B0 (نمونه فاقد بور) مشخص است، عمده فازهای موجود در فلز جوش

نمودار CCT به سمت زمان‌های طولانی و دماهای پایین تر می‌گردد و لذا، محصول استحاله آستنیت به فریت را از ریزساختار عمدتاً فریت مرزدانه‌ای و ویدمن اشتاتن به ریز ساختار عمدتاً فریت سوزنی متمایل می‌کند. از ویژگی‌های عنصر بور حد حلالیت کم در فاز آستنیت و فریت می‌باشد (حدود ۰/۰۰۲ درصد وزنی) و لذا، همان‌گونه که در شکل ۵ از نقشه توزیع عنصر آلیاژی بور مشخص است، افزودن بور بیش از این مقدار موجب پراکندگی بور فوق اشباع هم در مرزدانه و هم در داخل دانه‌ها شده‌اند، انرژی کرنشی موضعی شبکه را افزایش داده و تشکیل فریت ویدمن اشتاتن و چندوجهی را تسهیل می‌کند و مانع تشکیل فریت سوزنی می‌شود [۹ و ۱۹-۲۲]. هرچه آخال‌ها در سطح فلز جوش پراکنده و ریز باشند، مانع رشد دانه‌های آستنیت اولیه شده و لذا، مرزدانه بیش‌تر برای رشد فریت مرزدانه‌ای فراهم می‌آوردند و برعکس آخال‌های درشت و متمرکز نقش مکان‌جوانه زنی برای فریت سوزنی را ایفا می‌کنند [۱۸] که البته با توجه به کسر حجمی برابر و چگونگی توزیع و اندازه تقریباً مشابه آخال‌ها در نمونه‌های گوناگون، از اثر آخال بر ریزساختار فلز جوش در این پژوهش صرف‌نظر شده است.

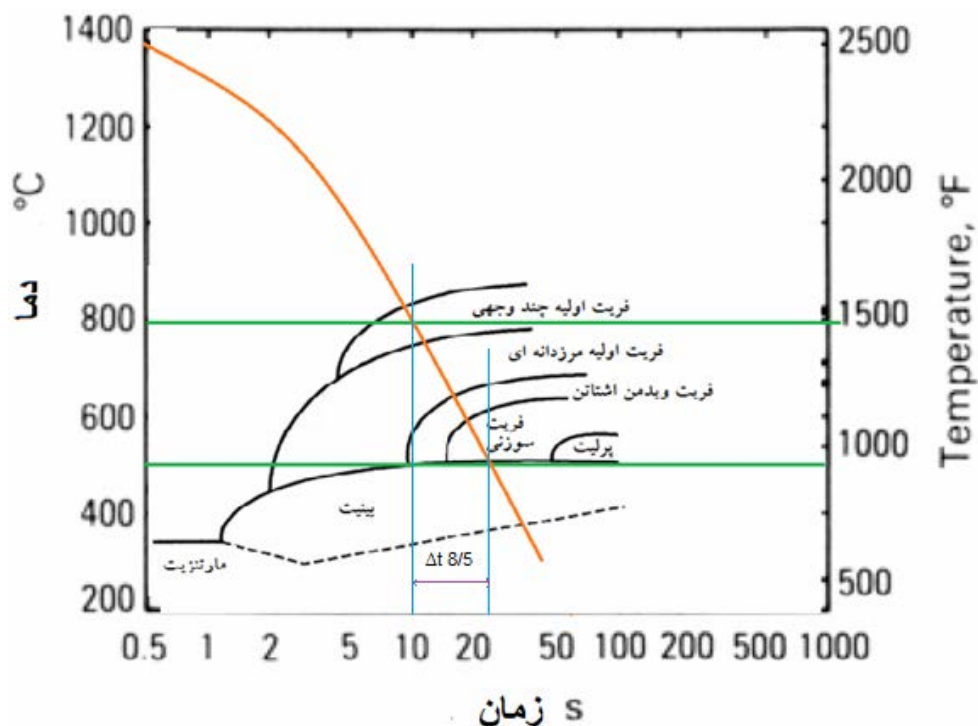
آزمون میکرو سختی

جدول ۹ و شکل ۷ نتایج آزمون میکرو سختی فلز جوش را ارائه می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است، حضور ۲۰ ppm بور، کاهش سختی نسبت به نمونه خام را در پی داشته، اما با افزایش بور تا ۱۱۰ ppm سختی دوباره افزایش یافته است. در همین راستا همان‌گونه که در بخش ریزساختار میکروسکوپی اشاره شد، ریزساختار فلز جوش از فریت‌های مرزدانه‌ای در نمونه خام به ساختار عمدتاً فریت سوزنی در نمونه حاوی ۲۰ ppm بور و با افزایش بور از ۲۰ تا ۱۱۰ ppm ساختار عمدتاً فریت چندوجهی و فریت ویدمن اشتاتن تغییر کرده است. از آن‌جا که سختی به نوع ساختار بستگی دارد، مشخص شد که ساختار فریت سوزنی ساختاری نرم بوده و انتظار آن می‌رود که چقرمگی ضربه بالایی داشته و در مقابل ساختار فریت ویدمن اشتاتن و چندوجهی و مرزدانه‌ای که (سخت ترند)، چقرمگی ضربه پایین‌تری داشته باشند. جهت بررسی درستی این موضوع آزمون ضربه انجام گرفت.

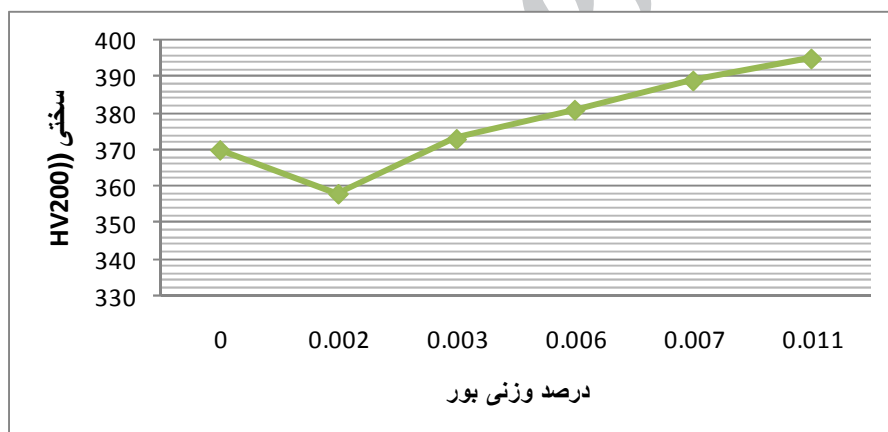
ریزساختاری فلز جوش دو عامل دما و نرخ سرد شدن می‌باشد. با توجه به مقادیر اختلاف پتانسیل، شدت جریان و سرعت جوشکاری ارائه شده در جدول ۵، بر اساس رابطه ۱، حرارت ورودی برای این آزمایش برابر ۲/۱۳-۱/۹۳ کیلوژول بر میلی‌متر محاسبه گردید. نرخ سرد شدن در جوشکاری هم با در نظر گرفتن $\Delta t_{8/5} = 0.52 j / cms^{\circ}C$ [۱۶] برای فولادهای کربنی، دمای بین پاسی $150 \pm 50^{\circ}C$ و $Q_w = 1/93 - 2/13$ kJ/mm بر اساس رابطه ۲، برابر ۱۰-۱۲ sec بدست آمد. بر همین اساس، نرخ سرمایش از دمای ۸۰۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد برابر با $30 - 25^{\circ}C/sec$ خواهد بود که در شکل ۶ نمایش داده شده است.

چن^۱ [۱۷] بهترین جدایش بور را در نرخ سرمایش $33 - 27^{\circ}C/sec$ می‌داند که تطابق نسبی با نرخ سرمایش در این پژوهش دارد. با توجه به ریزساختار حاصل و دیگرام CCT شکل ۶ می‌توان تغییرات ریزساختاری را به شرح زیر بررسی کرد: ابتدا با سرد شدن آستنیت (۷) از دمای بالا، فریت (α) اولیه مرزدانه‌ای و چندوجهی در مرزدانه‌ها جوانه زده و به سمت داخل دانه‌ها رشد می‌کند و در دماهای پایین‌تر، قابلیت تحرک جبهه رشد صفحه‌ای فریت مرزدانه‌ای کاهش یافته و بنابراین، فریت ویدمن اشتاتن (فریت با صفحات جانبی) امکان رشد سریع‌تری خواهد یافت. در حین رشد فریت ویدمن اشتاتن اتم‌های جانشین امکان نفوذ ندارند. در دماهای بسیار پایین‌تر، سرعت رشد فریت ویدمن اشتاتن به درون دانه بسیار کاهش یافته و بنابراین، جوانه‌های جدید فریت سوزنی در جلوی فریت در حال رشد جوانه زده و رشد می‌کنند [۱۸]. هم‌چنین، با توجه به شکل ۴ می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش بور تا ۲۰ ppm در فلز جوش برای نمونه B1 کسر حجمی فریت سوزنی افزایش و کسر حجمی فریت مرزدانه‌ای، ویدمن اشتاتن و چندوجهی کاهش یافته است. با بیش‌تر شدن مقدار بور تا ۱۱۰ ppm در نمونه‌های B2 تا B5 کسر حجمی فریت سوزنی و مرزدانه‌ای کاهش و فریت ویدمن اشتاتن و چندوجهی افزایش یافته است. از سوی دیگر، حضور ۰/۰۰۲ درصد وزنی بور به عنوان یک عنصر آلیاژی (عامل موثر بر سختی پذیری) باعث حرکت

¹-Chen



شکل ۶- دیاگرام CCT فلز جوش فولاد ساده کربنی و $\Delta t_{8/5}$ در این پژوهش.



شکل ۷- نمودار سختی بر حسب مقدار بور موجود در فلز جوش.

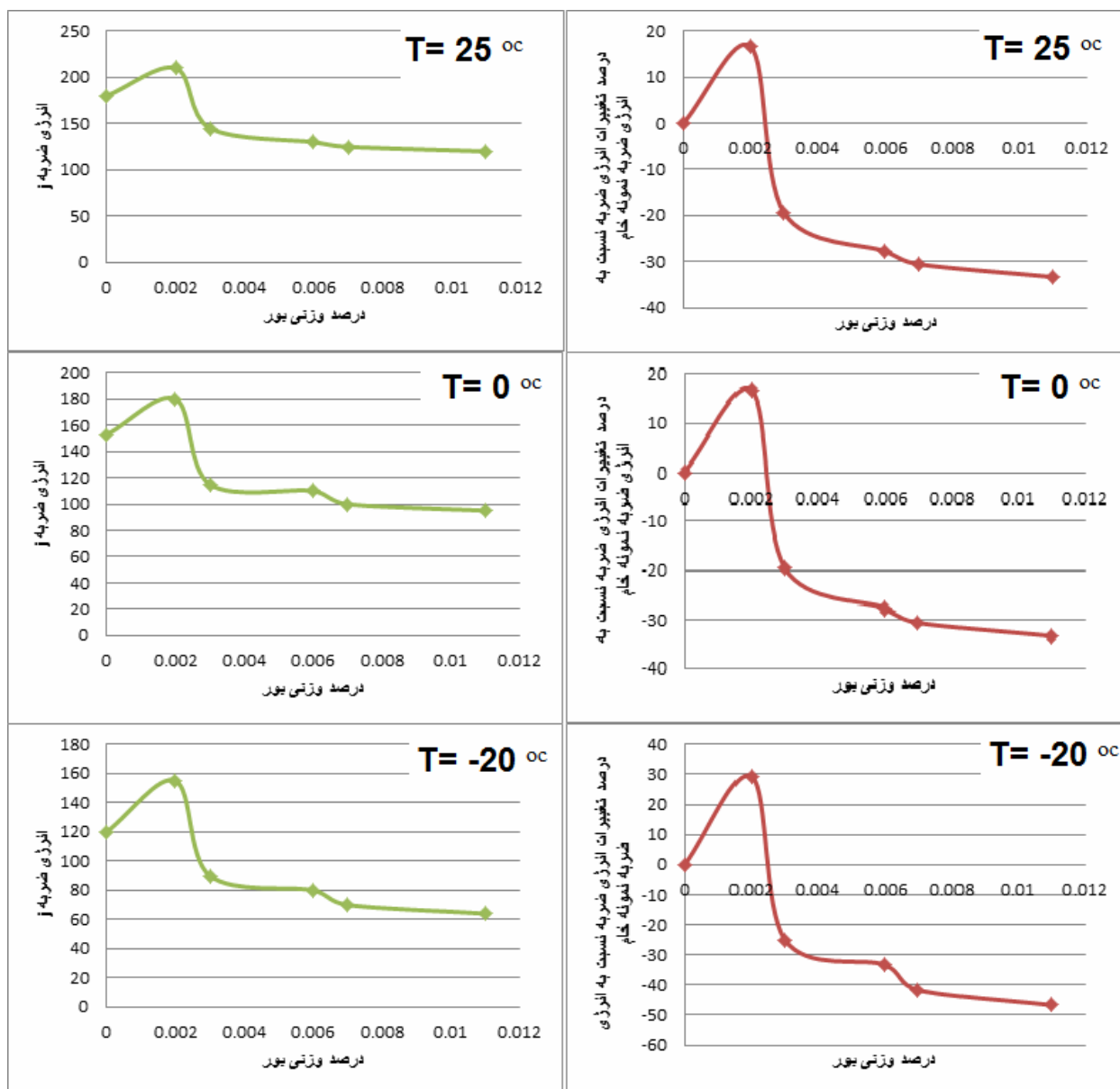
نسبت به نمونه فاقد بور مشاهده می‌شود. در شکل ۸ نتایج آزمون ضربه بر حسب مقدار بور در فلز جوش در دماهای گوناگون به صورت نمودار به نمایش درآمده است. همان‌گونه که از شکل ۸ مشخص است، در تمامی نمودارها نمونه حاوی ۲۰ ppm بور بالاترین انرژی ضربه را در تمامی دماها دارا می‌باشد.

آزمون ضربه

نتایج آزمون ضربه در جدول ۱۰ ارائه شده است. همان‌گونه که در جدول ۱۰ مشاهده می‌شود، افزایش مقدار بور تا ۲۰ ppm بهبود خواص ضربه (در هر سه دما: محیط، صفر و ۲۰- درجه سانتی‌گراد) نسبت به نمونه فاقد عنصر بور را در پی دارد. در سایر نمونه‌ها، یعنی با افزایش بور از ۲۰ تا ۱۱۰ ppm کاهش خواص ضربه پذیری در هر سه دما

جدول ۱۰- نتایج آزمون ضربه نمونه های گوناگون.

نمونه	شرایط دمایی	نتایج آزمون ضربه J	میانگین	% در صد تغییرات
B0	محیط	۱۷۵ و ۱۷۸ و ۱۸۱ و ۱۸۶ و ۱۸۰	۱۸۰	--
	۰°C	۱۵۵ و ۱۵۶ و ۱۵۰ و ۱۵۴ و ۱۵۰	۱۵۳	--
	-۲۰°C	۱۱۸ و ۱۲۰ و ۱۲۰ و ۱۲۵ و ۱۱۷	۱۲۰	--
B1	محیط	۲۰۸ و ۲۱۰ و ۲۱۳ و ۲۱۴ و ۲۰۵	۲۱۰	۱۶/۶۷
	۰°C	۱۶۳ و ۱۹۱ و ۱۸۶ و ۱۸۰ و ۱۸۰	۱۸۰	۱۷/۶۵
	-۲۰°C	۱۵۹ و ۱۶۲ و ۱۵۵ و ۱۴۹ و ۱۵۰	۱۵۵	۲۹/۱۷
B2	محیط	۱۴۵ و ۱۳۵ و ۱۳۵ و ۱۴۰ و ۱۱۵	۱۴۵	-۱۹/۴۵
	۰°C	۱۲۰ و ۱۱۰ و ۱۱۵ و ۱۱۵ و ۱۱۰	۱۱۵	-۲۴/۸۴
	-۲۰°C	۷۵ و ۸۰ و ۶۵ و ۹۰ و ۸۰	۹۰	-۲۵
B3	محیط	۱۳۰ و ۱۳۸ و ۱۳۰ و ۱۳۰ و ۱۲۲	۱۳۰	-۲۷/۷۸
	۰°C	۱۱۰ و ۱۰۷ و ۱۱۸ و ۱۰۳ و ۱۱۲	۱۱۰	-۲۸/۱۱
	-۲۰°C	۷۷ و ۷۸ و ۷۲ و ۸۵ و ۸۸	۸۰	-۳۳/۳۴
B4	محیط	۱۲۵ و ۱۲۵ و ۱۳۰ و ۱۲۰ و ۱۲۵	۱۲۵	-۳۰/۵۵
	۰°C	۹۰ و ۹۵ و ۱۱۰ و ۱۰۰ و ۱۰۵	۱۰۰	-۳۴/۶۴
	-۲۰°C	۷۰ و ۷۵ و ۷۱ و ۶۴ و ۷۰	۷۰	-۴۱/۶۶
B5	محیط	۱۲۰ و ۱۲۰ و ۱۲۲ و ۱۲۰ و ۱۱۸	۱۲۰	-۳۳/۳۳
	۰°C	۹۵ و ۹۶ و ۹۸ و ۹۳ و ۹۳	۹۵	-۳۷/۹۰
	-۲۰°C	۶۴ و ۶۶ و ۶۵ و ۶۵ و ۶۰	۶۴	-۴۶/۶۶



شکل ۸- نمودار انرژی ضربه و درصد تغییرات انرژی ضربه نسبت به نمونه خام بر حسب درصد وزنی بور در فلز جوش در سه دما.

ب- در نمونه حاوی ۲۰ppm بور که بهترین نتیجه مقاومت به ضربه را دارد، فریت مرزدانه ای منقطع و نازکتر نسبت به سایر نمونه‌ها به نظر می‌رسد، همچنین، به دلیل بزرگ بودن دانه های آستنیت متحول شده در این نمونه مرزدانه کم‌تر و در نهایت، فریت مرزدانه ای کم‌تر بوده است که عاملی بر بهبود انرژی ضربه خواهد بود [۲۳].

ج- فرآیند استفاده شده در این پژوهش، یعنی جوشکاری زیر پودری با حرارت ورودی بالا، نرخ سرد شدن آهسته را در پی دارد که ریز ساختار را از ساختار فریت

با در نظر گرفتن ریزساختار میکروسکوپی و سختی نمونه‌ها و مقایسه نتایج بدست آمده با نتایج سایر پژوهشگران در این زمینه، دلایلی در مورد تغییرات انرژی ضربه در حضور عنصر بور در موردهای زیر قابل تحلیل می‌باشد:

الف- افزایش فریت سوزنی در حضور ۲۰ppm بور نسبت به نمونه فاقد بور و نسبت به سایر نمونه‌ها که بور بیشتری دارند و نظر به این که فریت سوزنی با دارا بودن ساختاری با اندازه دانه ریز و در هم تنیده بیشترین مقاومت در برابر اشاعه ترک را از خود نشان می‌دهد.

الکترونی روبشی بررسی شد. تصاویر ماکرو و میکرو گرفته شده با میکروسکوپ SEM از مقطع شکست، در شکل‌های ۹-۱۱ به نمایش گذاشته شده است و درصد شکست ترد محاسبه شده با نرم افزار آنالیز تصویر در جدول ۱۱ ارائه شده است.

همان‌گونه که از شکل‌های ۹-۱۱ مشخص است، سطح شکست نمونه حاوی ۲۰ ppm بور که بالاترین انرژی ضربه را در هر سه دما دارد و ریز ساختار آن بیش‌تر فریت سوزنی است، در تصویر ماکرو اغلب کدر و تیره است و خطوط لغزش نشان از تغییر فرم پلاستیک فراوان دارد و در تصویر میکرو حفرات عمیق به روشنی مشاهده می‌شود که نشان از شکست عمدتاً نرم می‌باشد. و برعکس، سطح شکست نمونه حاوی ۱۱۰ ppm بور با کم‌ترین انرژی ضربه و ساختار عمدتاً فریت ویدمن اشانتن و فریت چندوجهی، در تصویر ماکرو، اغلب براق و گوشه دار و در تصویر میکرو صاف است که نشان از شکست ترد می‌باشد. همان‌گونه که در جدول ۱۱ مشخص است، سهم شکست ترد نمونه B1 با بالاترین انرژی ضربه در دمای محیط صفر بوده و به بیان دیگر، شکست به صورت کاملاً نرم انجام گرفته است و در نهایت، در دمای ۲۰- درجه سانتی‌گراد این سهم به ۱۰ درصد می‌رسد. در مقابل سهم شکست ترد نمونه B4 با کم‌ترین انرژی ضربه در دمای ۲۰- درجه سانتی‌گراد حدود ۵۰ درصد بوده است.

جدول ۱۱- درصد شکست ترد حاصل از بررسی

مقطع شکست به کمک نرم افزار آنالیز تصویر.

دما	محیط	صفر	۲۰-
درصد شکست ترد نمونه B1	۰	۶/۵	۱۰
درصد شکست ترد نمونه B5	۹/۳	۱۵/۷	۴۶/۴

سوزنی به ساختار به ترتیب، فریت ویدمن اشانتن، فریت چند وجهی و در نهایت، فریت مرزدانه ای تغییر داده است. در نمونه حاوی ۲۰ ppm بور، عنصر بور با محدود کردن فرآورده های دمای بالا نظیر فریت ویدمن اشانتن و چندوجهی و در آخر مرزدانه ای، محصول استحاله بیش‌تر فریت سوزنی شده است، اما در سایر نمونه ها که انرژی ضربه نسبت به نمونه خام کاهش یافته است، بور مازاد بر حد حلالیت پس از اشباع مرزدانه ها در داخل دانه پراکنده شده و لذا، انرژی فصل مشترک مرزدانه ای را افزایش داده است و شرایط را برای جوانه زنی فریت چندوجهی و ویدمن اشانتن طی استحاله از آستینیت فراهم آورده است که خواص ضربه پذیری ضعیف تری نسبت به فریت سوزنی دارند و لذا، این ساختارها زمینه را برای رشد و اشاعه ترک خصوصاً در نرخ های بالای کرنش نظیر آزمون ضربه فراهم می‌آورند.

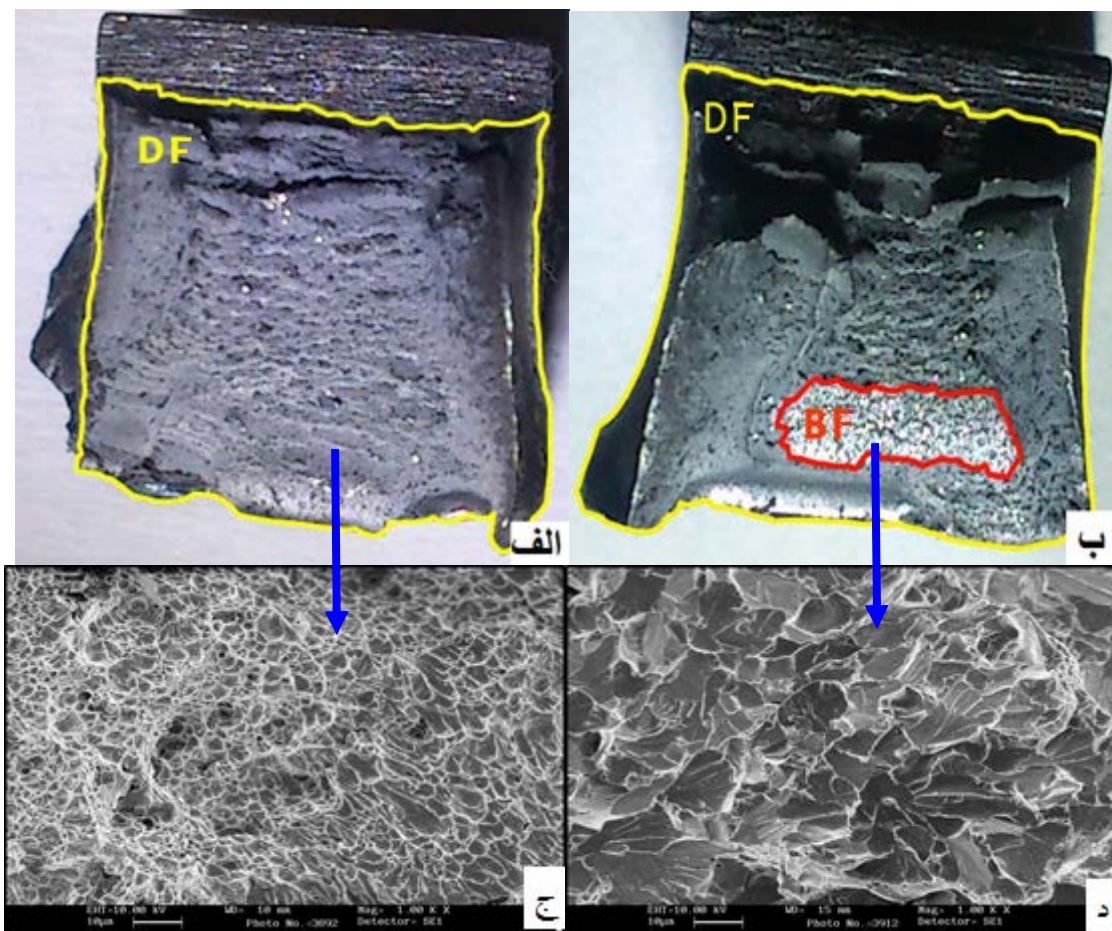
د- با افزایش سختی چقرمگی ضربه کاهش می‌یابد [۲۴]. در تایید این موضوع همان‌گونه که در بخش نتایج آزمون سختی مشخص گردید، نمونه حاوی ۲۰ ppm بور با بهترین چقرمگی ضربه کم‌ترین سختی و نمونه های دیگر با چقرمگی ضربه پایین، بیش‌ترین سختی را ارائه داده اند.

ه - با افزایش اندیس بازی^۱ BI، مقدار فریت سوزنی افزایش می‌یابد [۱۸] پس با توجه به این موضوع که اکسید بور B₂O₃ اکسید اسیدی است، پس با افزایش آن از قلیابیت فلاکس کاسته شده و در نتیجه، مقدار فریت سوزنی کاهش می‌یابد. بنابراین، یکی از علل کاهش فریت سوزنی و در پی آن کاهش چقرمگی در نمونه‌های حاوی ۲۰ تا ۱۱۰ ppm بور کاهش قلیابیت فلاکس به سبب افزودن مقدار اکسید بور اولیه در آن نمونه ها می‌باشد.

شکست نگاری

جهت بررسی نوع شکست در سطح مقطع نمونه های ضربه و به بیان دیگر، بررسی اثر مقدار بور بر نوع شکست، مقطع شکست دو نمونه حاوی ۲۰ ppm بور با بالاترین نتایج انرژی ضربه و نمونه حاوی ۱۱۰ ppm بور با کم‌ترین انرژی ضربه در دماهای گوناگون، به وسیله میکروسکوپ

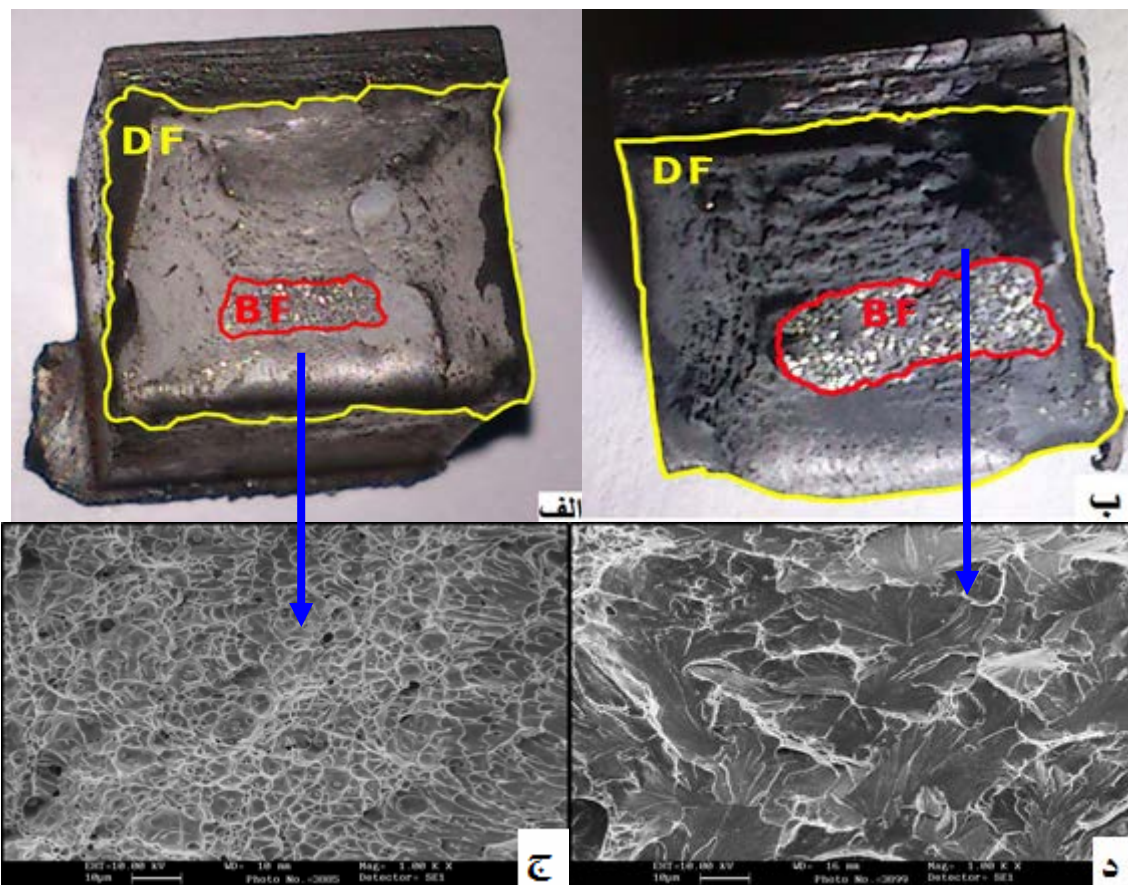
¹-Basicity Index



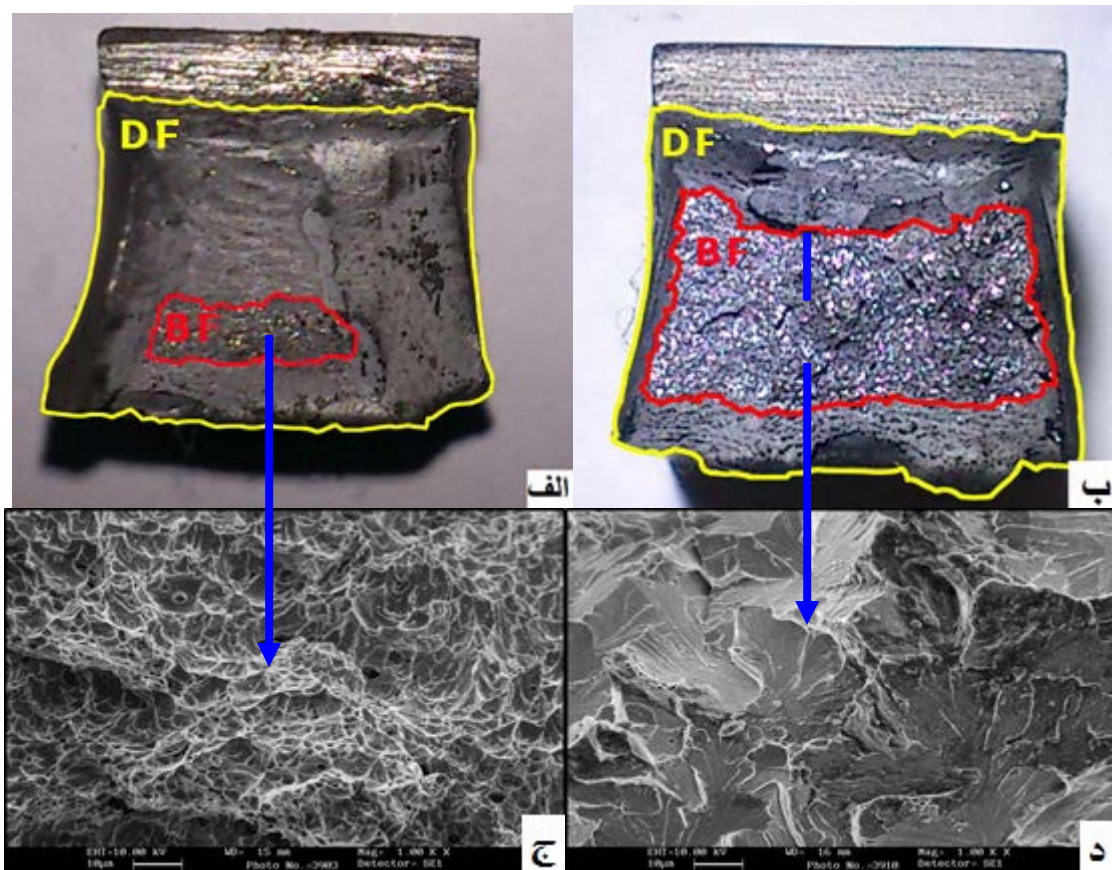
شکل ۹- تصویر مقطع شکست نمونه های حاوی بور در دمای محیط، تصویر استریو:الف) ۲۰ppm- سطح کدر و تیره و خطوط لغزش ب) ۱۱۰ ppm- قسمت براق و گوشه دار مشخص شده است- تصویر SEM:ج) ۲۰ ppm- حضور حفرات (د) ۱۱۰ppm- سطح صاف، ^۱DF: شکست نرم - ^۲BF: شکست ترد.

^۱ - Ductile Fracture

^۲ -Brittle Fracture



شکل ۱- تصویر مقطع شکست نمونه های حاوی بور در دمای صفر (+) درجه سانتی گراد، تصویر استریو: (الف) ۲۰ ppm - سطح کدر و تیره (ب) ۱۱۰ ppm - قسمت براق و گوشه دار مشخص شده است - تصویر SEM: (ج) ۲۰ ppm - حضور حفرات (د) ۱۱۰ ppm - سطح صاف ، DF: شکست نرم -BF: شکست ترد.



شکل ۱۱- تصویر مقطع شکست نمونه های حاوی بور در دمای منفی بیست (-۲۰) درجه سانتی گراد، تصویر استریو: الف) ۲۰ ppm - سطح کدر و تیره ب) ۱۱۰ ppm - قسمت براق و گوشه دار مشخص شده است - تصویر SEM (ج) ppm ۲۰ - حضور حفرات د) ۱۱۰ ppm - سطح صاف ، DF: شکست نرم - BF: شکست ترد.

نتیجه گیری

این پژوهش بمنظور تعیین مقدار بهینه عنصر بور موثر بر انرژی ضربه در دماهای پایین فلز جوش فولاد ساده کربنی جوشکاری شده به روش SAW انجام شد و نتایج زیر بدست آمد:

۱- بور با حضور در مرزدانه های آستنیت متحول شده موجب کاهش انرژی فصل مشترک مرزدانه ها شده و شکل گیری فریت مرزدانه ای را به تعویق می اندازد و لذا، افزایش بور موجب کاهش فریت مرزدانه ای می شود.

۲- در حضور ۲۰ ppm بور فریت سوزنی افزایش و فریت ویدمن اشتاتن، فریت چندوجهی و فریت مرزدانه ای کاهش می یابند.

۳- با افزایش بور از ۲۰ تا ۱۱۰ ppm غالب ساختار را فریت های ویدمن اشتاتن و چند وجهی تشکیل می دهند.

۴- بور مازاد بر حد حلالیت (۲۰ ppm) پس از اشباع مرزدانه ها، در داخل دانه پراکنده می شود و با افزایش انرژی فصل مشترک مرزدانه ای، شرایط را برای تشکیل فریت مرزدانه ای، ویدمن اشتاتن و چندوجهی که خواص ضربه ای خوبی ندارند، طی استحاله از آستنیت فراهم می آورد.

۵- با افزایش مقدار بور تا ۲۰ ppm سختی فلز جوش کاهش، ولی پس از آن تا ۱۱۰ ppm بور افزایش سختی نتیجه خواهد شد.

۶- با افزایش مقدار فریت ویدمن اشتاتن و فریت چندوجهی در ساختار، سختی فلز جوش افزایش و در مقابل با افزایش فریت سوزنی سختی فلز جوش کاهش می یابد.

۱۰ درصد و برای نمونه حاوی ppm ۱۱۰ بور با کمترین انرژی ضربه حدود ۵۰ درصد می باشد.

سپاسگزاری

در پایان بر خود لازم می دانیم که از شرکت صنعتی اما که بر این جانان منت نهاده و با حمایت های همه جانبه خود نقش بزرگی در به انجام رسیدن این پژوهش ایفا نمودند، کمال تشکر و قدردانی را داشته باشیم.

References

- 1- Y. Penga, W. Chena, and Z. Xub, "Study of High Toughness Ferrite Wire for Submerged Arc Welding of Pipeline Steel", Materials Characterization, Vol.47, pp. 67-73, 2001.
- ۲- م ترجم نژاد و ر دهلمائی و ص معینی فر، " بررسی حرارت ورودی فرآیند GTAW بر خوردگی اتصالات جوش فولاد زنگ نزن دوفازی 2205"، مجله مواد نوین، جلد ۵، شماره ۱، پاییز ۱۳۹۳.
- 3- P. Ernst, "Effect of Boron on The Mechanical Properties of Modified 12 % Chromium Steels", PhD. Thesis, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, 1988.
- ۴- ارحیمی و م حسینیون و و شکوهی، " اثر B و Ti در چقرمگی جوش های کم آلیاژی مولیبدنی به روش زیر پودری در دو حالت دو پاسه و چند پاسه"، هشتمین کنفرانس ملی جوش و بازرسی ایران، تهران، صفحات ۲۵۰-۲۶۳، ۱۳۸۶.
- 5- N. Mori, H. Homma, M. WakabaYashi, and S. Okita, "Characteristics of Mechanical Properties of Ti-B Bearing Weld Metals", IIW Doc. 2- 980, 1982.
- ۶- ا ابراهیمی، "بررسی حرارت ورودی و عناصر اکسیژن و نیتروژن و بور بر چقرمگی فلز جوش SAW لوله های با جداره های ضخیم"، همایش فرآیند جوشکاری قوسی زیر پودری (اتوماتیک)، شرکت صنعتی اما، ۱۳۷۷.
- 7- D. Ren, F. Xiao, P. Tian, X. Wang, and B. Liao, "Effects of Welding Wire Composition and Welding Process on The Weld Metal Toughness of Submerged Arc Welded Pipeline Steel", International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, Vol. 16, Number 1, pp. 65-71, 2009.
- 8- D. W. Oh, D. L. Olson, and R. H. Frost, "The Influence of Boron and Titanium on

۷- حضور ppm ۲۰ بور در فلز جوش موجب بهبود انرژی ضربه در سه دمای محیط، صفر و ۲۰- درجه سانتی- گراد می شود.

۸- با افزایش بور از ppm ۲۰ در فلز جوش چقرمگی ضربه کاهش می یابد.

۹- در دمای ۲۰- درجه سانتی گراد سهم شکست ترد برای نمونه حاوی ppm ۲۰ بور با بالاترین انرژی ضربه

Low-Carbon Steel Weld Metal", Welding Research Supplement, Washington-D.C, pp. 151-158, 1990.

9- D. J. Widgery, "New Idea in SAW", Trends in Steels and Consumables International Conference, London, pp. 26-40, 1978.

10- H. W. Lee, "The Relationship between Boron Content and Crack Properties in FCAW Deposited Metal", Welding Journal, Busan City, Korea, pp. 131-136, 2006.

11- T. Khoshioet, "Development of the High COD Ti-B Bearing Covered Electrode", IIW, Doc. 2, 955, 1981.

12- C. P. Ravichandran, "Influence of Ti-B Microalloying Additions on Sub-Zero Notch-Toughness of AWS E7018 Electrode All-Weld Metal Deposits", Welding Research Institute, BHEL, India, 2001.

13- J. H. Devletian and R. W. Heine, "Grain Refining Effect of Boron in Carbon Steel Welds", Welding Research Supplement, pp. 529-538, 1973.

۱۴- ع ولی نژاد، "جدول و استانداردهای فولاد (کلید فولاد)"، چاپ دهم، انتشارات طراح، ۱۳۹۱.

۱۵- ح ثابت، "تکنولوژی و متالورژی جوشکاری"، نشر فنی امیر، صفحات ۴۳-۴۸، ۱۳۸۷.

16- C. Long and N. sayma, "Heat Transfer", Ventus Publishing ApS, 2009.

17- W. Chen, M.C. Chaturvedi, N.L. Richards, and G. Mahon "Grain Boundary Segregation of Boron in INCONEL 718", Metallurgical and Materials Transactions, Vol. 29A, pp. 1947-1955, 1998.

18- S. Kou, "Welding Metallurgy", 2nd Ed., John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2003.

19-N.Haracic, "Bor and Boron Low Alloyed Steels for Carburisation and Direct Quenching", Masinstvo Journal, Sarajevo, pp. 215-226, 2002.

20- T.V. Rompaey, K.C.H. Kumar, and P. Wollants "Thermodynamic Optimization of The B-Fe System", Journal of Alloys and Compounds 334, pp. 173-181, -2002.

21-G.E.Totten, "Steel Heat Treatment: Metallurgy and Technology", 2nd Ed., CRC press- Taylor&Francis Group, pp. 194, 2007.

22-W.Leslie, "The Physical Metallurgy of Steels", MC Graw-Hill, Tokyo-Japan, p. 279, 1981.

23- G. J. Davies and J. G. Garland, "Solidification Structures and Properties of Fusion Welds", International metallurgical Reviews, Vol. 20, New York, pp. 83-106, 1975.

24- Metal's Handbook, vol 4, Heat Treating, ASM, 1991.

۲۵- راهنمای فنی محصولات تولیدی شرکت صنعتی آما-
چاپ بیست و دوم - ۱۳۹۲.

Archive of SID