نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال پنجم، شماره 1، بهار و تابستان1398، صفحه91-77

تأثیر آخالها بر تشکیل فریت سوزنی شکل در جوشکاری زیرپودری فولاد کم آلیاژیAPI5L-X65

جواد ملائی میلانی ، توحید سعید*

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند

(دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۳/۱۹ ؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۶/۲۱)

چکیده

در پژوهش حاضر اثر تغییر مشخصه های آخالهای بوجود آمده در جوشکاری زیرپودری فولاد کم آلیاژی API5l-X65، برتشکیل فریت سوزنی شکل مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور ایجاد آخالهایی با مشخصه های متفاوت نظیر ترکیب شیمیایی و اندازه آخال، از سه نوع پودر جوشکاری با ترکیب شیمیایی متفاوت و اندیس بازیسیته های ۰/۷۲، ۰/۸۲ و ۰/۹۹ و دو حرارت ورودی مختلف ۱/۶ kJ/mm و ۲/۴ kJ/mm در جوشکاری بهره برده شده است. نتایج حاصل بیانگر این امر است که عملکرد آخالها به عنوان مکانهای مرجح جوانه زنی فریت سوزنی شکل و بهبود ریزساختار و در نتیجه خواص مکانیکی در شرایطی قابل مشاهده است که پودر مورد استفاده دارای کمترین اندیس بازیسیته بوده و حرارت ورودی بالاتر باشد.تحت این شرایط درصد آخال‌های با میزان اکسید تیتانیم بالاو با اندازه ۰/۵ تا ۱/۵ میکرومتر افزایش یافته و باعث افزایش میزان فریت سوزنی شکل در ریزساختار می شود. در صورتیکه در بقیه شرایط جوشکاری بوجود آمدن فریت مرزدانه‌ای سبب کاهش میزان فریت سوزنی شکل شده و سبب تضعیف خواص مکانیکی فلز جوش در مقایسه با فلز پایه می شود.

کلمات کلیدی: فریت سوزنی شکل، آخال، جوشکاری زیرپودری، فولاد کم آلیاژی.

Effect of Inclusions on Acicular Ferrite Formation in Submerged Arc Welding of API5L-X65

J. M. Milani, T. Saeid

Faculty of Materials Engineering, Sahand University of Technology, Sahand, Iran

(Received 9 June 2018 ; Accepted 12 September 2018)

Abstract

In the present study, effect of inclusions characteristics changing on the formation of acicular ferritein submerged arc welding of API5l-X65 low alloy steel was investigated. Three different welding fluxes with different chemical composition and basicity index of 0.72, 0.82 and 0.99, and two different welding heat inputs of 1.6 kJ / mm and 2.4 kJ /

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: saeid@sut.ac.ir

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

mm were used to create inclusions with different characteristics such as chemical composition and size. The results indicate that inclusions acting as acicular ferrite nucleation sites and improvement of the microstructure and resulted mechanical properties, can be observed in welding conditions in which the welding flux with lowest basicity index and higher welding heat input. Under these conditions, the percentage of inclusions with a high titanium oxide value and size range of 0.5 to 1.5 micrometers is increased, which increases the amount of acicular ferrite in the microstructure. However, in other welding conditions, formation of grain boundary ferrite reduces amount of acicular ferrite and weakens mechanical properties of weld metal compared to the base metal.

Keywords: Acicular Ferrite, Inclusions, Submerged Arc Welding, Low Alloy Steel.

1- مقدمه

سازه‌های دریایی، بدنه ناوهای جنگی، کشتی ها و زیردریایی‌ها در معرض بارگذاری های پیچیده ای هستند که از آن جمله می توان به باد، امواج دریا، ضربات شدید و نیروهایی وارده از طرف هلیکوپتر و هواپیماهای جنگی در موقع فرود اشاره کرد. از طرفی این سازه ها بایستی هم در مناطق گرمسیری و هم در مناطق با دمای پایین کارآیی بالایی داشته باشند و از آنجا که یکی از معمول ترین روش ها برای ساخت این تجهیزات، جوشکاری می باشد، نیاز به استفاده از فلزات و آلیاژهایی است که علاوه بر استحکام بالااز چقرمگی و جوش پذیری بالایی نیز برخوردار باشند[۱].تعداد آلیاژهایی که بتوانند از لحاظ بارگذاری، خواص خوردگی، مکانیکی و جوش پذیری رفتار مناسبی از خود نشان داده و قیمت مناسبی نیز داشته باشند، بسیار اندک است که فولادهای کم آلیاژی گروهی از این نوع مواد را تشکیل می‌دهند[۲].

با توجه به اینکه در جوشکاری انواع فولادها خواص فیزیکی، مکانیکی و مقاومت به خوردگی جوش ایجاد شده به شدت به ریزساختار جوش وابسته است، بنابراین بررسی های ریزساختاری از اهمیت قابل ملاحظه ای برخوردارند. پیدایش و تکامل ریزساختارهای جوش در فولادها ناشی از دو مرحله اصلی جوانه زنی و رشد است که تغییر در سازوکار و نحوه عملکرد هر کدام از این دو مرحله بر رخ دادن تحولات درون دانه ای و مرزدانه ای تأثیرگذار بوده که سبب تغییرات ریزساختاری شده و همین امر می تواند خواص مکانیکی و رفتار خوردگی فولاد را تحت تأثیر قرار دهد [۳].

آخال‌ها یا ناخـالصی های غیر فلـزی داخـل جوش، در بیشتـر موارد به عنوان عوامل ضعف ریزساختار و افت خواص مکانیکی جوش در نظر گرفته می شوند. پیدایش انواع آخال ها می تواند ناشی از واکنش های سرباره–مذاب، واکنش های مذاب–گاز، عملیات اکسیژن زدایی، عملیات گوگردزدایی و یا تمیزکاری نامناسب در جوشکاری های چند پاسه باشد [۴].

در بررسی تحولات ریزساختاری انجام شده در جوشکاری انواع فولادها، مشخص گردیده است که دو مکان مرجح جهت انجام تحولات ریزساختاری و یا به عبارت بهتر دو مکان مرجح جهت شروع تحولات ریزساختاری وجود دارند که عبارت است از مرزدانه های اولیه و داخل دانه ها. برای مثال در بررسی های ریزساختاری مربوط به تشکیل آستنیت از فریت در جوشکاری فولادهای زنگ نزن دوپلکس تشکیل آستنیت اولیه در مرزدانه های فریت و تشکیل آستنیت ثانویه در داخل دانه های فریت انجام می پذیرد و یا در جوشکاری فولادهای کم آلیاژ استحکام بالا تشکیل فریت مرز دانه ای در مرز دانه و تشکیل فریت سوزنی شکل در داخل دانه انجام می‌پذیرد[۵].انجام تحولات ریزساختاری در داخل دانه ها نیازمند وجود مکان های مرجح است که در صورت اعمال کنترلهای لازم،آخالها از جمله این مکان های مرجح به شمار می روند و در چنین شرایطی آخالها نقش مفیدی را در ایجاد ریزساختار مطلوب ایفا می کنند.برای مثال، آخالها می توانند به عنوان مکان مرجح جهت جوانه زنی فریت سوزنی شکل عمل کنند که بوجود آمدن این ساختار در فلز جوش باعث بهبود خواص مکانیکی از جمله افزایش مقاومت به ضربه می شود که این امر به دلیل ساختار ریزدانه و همچنین درهم تنیده فریت سوزنی شکل است. علاوه بر این، آخالها به عنوان سدهایی در

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

برابر تحرک مرز دانه ها عمل می کنند که می توانند سبب کاهش اندازه دانه فلز جوش شوند که همین امر باعث افزایش استحکام و چقرمگی جوش خواهد شد [۶].

در بررسی تأثیر آخالها بر تحولات ریزساختاری در جوشکاری فولادها، برخی از مشخصه های آخالهای ایجاد شده نظیر اندازه، ترکیب شیمیایی و درصد آخال تشکیل یافته از اهمیت به سزایی برخوردار است.در این راستا پژوهش حاضر تأثیر پارامترهای جوشکاری زیرپودری بر مشخصه های آخالهای تشکیل یافته و به تبع آن تأثیر مشخصه های حاصل بر ریزساختار و خواص مکانیکی فلز جوش فولاد کم آلیاژی API5L-X65 بررسی می کند. به منظور ایجاد آخالهای با مشخصه های متفاوت در این روش، از سه نوع پودر جوشکاری با ترکیب شیمیایی متفاوت و همچنین حرارتهای ورودی مختلف بهره گیری شده است.

2- مواد و روش تحقیق

در پـــژوهش حـــاضر از ورق فـــولاد کـم آلیاژی API5-X65 استفاده شده که ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی آن به ترتیب در جدول (۱و ۲) ارائه گردیده است. نمونه های طرح اتصال U شکل در ابعاد ۸×۸۰×۲۰۰ میلی متر برشکاری و به منظور آماده سازی قبل از جوشکاری، شیار یو شکل به پهنای ۴ میلی متر و عمق ۲ میلی متر و با زاویه شیار ۶۰ درجه ایجاد شد. به منظور رفع آلودگی های موجود بر روی صفحات، پس از برس زنی مکانیکی، نمونه ها با استفاده از الکل شستشو داده شد. برای جوشکاری زیرپودری نمونه های آماده سازی شده مطابق با استاندارد DIN EN 756، از فلز پرکننده S_2Moساخت شرکت صنعتی آما استفاده شد که جدول(۳) ترکیب شیمیایی آن را نشان می دهد. همچنین با توجه به هدف اصلی پژوهش که بررسی تأثیر مشخصه های انواع آخالها بر سازوکار تحولات ریزساختاری می باشد، مطابق با استاندارد EN 760 از سه نوع پودر جوشکاری با ترکیب شیمیایی متفاوت استفاده شد که جدول(۴) آنالیز اکسیدی مربوط به پودرهای مورد استفاده را نشان می دهد .

به منظور انجام‌جوشکاری از یک دستگاه جوشکاری زیرپودری

جدول۱- ترکیب شیمیایی فولاد مورد استفاده.

نوع عنصر	C	Si	Mn	P	S	V	Ti	Al	Ni	Cr	Fe
درصد وزنی	۰/۱۴۲	۰/۳۰۴	۱/۶۴۰	۰/۰۱۱	۰/۰۱۷	۰/۰۰۵	۰/۰۲۹	۰/۰۴۲	۰/۰۳۱	۰/۰۵۰	Bal.

جدول۲- خواص مکانیکی فولاد مورد استفاده.

	استحکام تسلیم (مگا پاسکال)	استحکام کشش (مگا پاسکال)	ازدیاد طول (درصد)	انرژی جذب ضربه در دمای C ۲۰- (ژول)
نمونه مورد استفاده	۴۸۸	۵۶۸	۲۴	۱۰۸
نمونه استاندارد	۴۵۰(min)	۷۶۰-۵۳۵	۲۲(min)	---

جدول۳-ترکیب شیمیایی فلز پرکننده

نوع عنصر	C	Si	Mn	Mo
درصد وزنی	۰/۱۰۲	۰/۱۵۱	۱/۰۵۷	۰/۵۲۴

جدول۴- آنالیز اکسیدی پودرهای جوشکاری مورد استفاده در روش زیرپودری

	درصد وزنی ترکیب						
نوع پودر	MgO	TiO_2	CaO	Al_2O_3	SiO_2	MnO	B.I
SA AR 1 88 AC	۰/۳۵	۵	۱۰/۵	۲۷/۷۵	۲۳/۴۳	۲۳/۷	۰/۷۲
SA CS 1 98 AC	۷/۱۶	۰/۶۸	۱۷	۷/۹۴	۳۶/۴۳	۱۸/۵	۰/۸۲
SA AB 1 67 AC H5	۲/۶۵	۱/۱۳	۲۴/۵	۲۲/۹	۲۱/۵۸	۱۲/۳۲	۰/۹۹

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

جدول ۵- شرایط جوشکاری و کدگذاری نمونه های جوشکاری

شناسه نمونه	شدت جریان (آمپر)	سرعت جوشکاری (میلیمتر بر دقیقه)	اختلاف پتانسیل (ولت)	نوع پودر	حرارت ورودی (کیلو ژول بر میلیمتر)
X1	۴۵۰	۵۰۰	۳۰	SA AB 1 67 AC H5	۱/۶
X2	۴۵۰	۵۰۰	۳۰	SA CS 1 98 AC	۱/۶
X3	۴۵۰	۵۰۰	۳۰	SA AR 1 88 AC	۱/۶
X4	۵۵۰	۵۰۰	۳۵	SA AB 1 67 AC H5	۲/۴
X5	۵۵۰	۵۰۰	۳۵	SA CS 1 98 AC	۲/۴
X6	۵۵۰	۵۰۰	۳۵	SA AR 1 88 AC	۲/۴

جدول۶-متوسط ترکیب شیمیایی آخالهای تشکیل یافته در نمونه های جوش

شماره نمونه	درصد وزنی								
	O	Mg	Al	Si	S	Ca	Ti	Mn	Fe
X1	۱۹/۶۰	۰/۰۶	۶/۳۱	۵/۱۴	۰/۴۵	۰/۶۴	۲/۱۳	۱۲/۸۰	Bal.
X2	۲۸/۴۹	۰/۱۸	۳/۷۰	۸/۴۱	۰/۴۵	۰/۲۶	۱/۴۲	۱۴/۶۹	Bal.
X3	۳۹/۷۷	۰/۰۱	۷/۴۱	۶/۷۰	۰/۴۱	۰/۱۸	۳/۱۴	۱۶/۹۵	Bal.
X4	۲۳/۵۳	۰/۰۸	۵/۴۴	۶/۵۴	۰/۳۸	۰/۶۶	۲/۶۷	۱۳/۴۷	Bal.
X5	۳۴/۰۱	۰/۲۸	۳/۹۹	۱۰/۹۷	۰/۴۸	۰/۵۷	۱/۶۲	۱۵/۳۳	Bal.
X6	۴۷/۸۵	۰/۰۱	۸/۰۴	۸/۱۱	۰/۳۱	۰/۵۱	۵/۷۷	۱۸/۶۶	Bal.

جدول۷- اندازه متوسط و کسر سطحی آخالهای تشکیل یافته در نمونه های جوش

	X1	X2	X3	X4	X5	X6
اندازه متوسط آخالها(µm)	۰/۳۵	۰/۵۳	۰/۷۲	۰/۴۷	۰/۶۴	۰/۹۲
درصد سطحی آخالها (%)	۵/۴	۸/۵	۱۰/۶	۶/۸	۹/۶	۱۴/۲

زیرپودری مدل PARS ARC1203T معمولی تک سیم با سیستم تغذیه سیم جوش به همراه تراک و حداکثر جریان خروجی ۱۲۰۰ آمپر استفاده شد که جدول(۵) شرایط جوشکاری و کدگذاری نمونه ها را نشان می دهد.

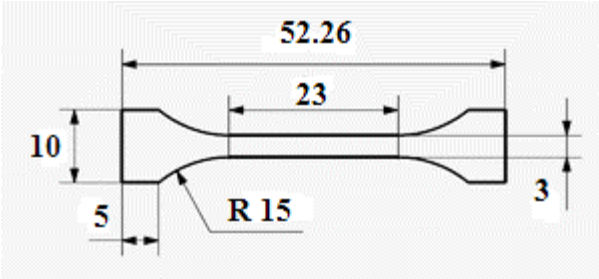
بررسی های ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشیTE-Scan-MIRA3و بر روی مقطع عرضی نمونه ها انجام گرفت و پس از آماده سازی سطحی در محلول ۲ درصد نایتال حکاکی شیمیایی بر روی آنها انجام شد. به منظور تعیین درصد فازها در ریزساختار و همچنین بررسی مشخصه های آخال از جمله اندازه و توزیع آنها از نرم افزار ImageJ بهره گرفته شد. لازم به ذکر است برای تعیین ترکیب شیمیایی فلز پایه، فلز جوش و آخالها از طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS) استفاده شد.

جهت تعیین اندازه دانه آستنیت اولیه از ترکیب روشهای حکاکی حرارتی و شیمیایی استفاده شد. به منظور مطالعه خواص کششی فلز پایه، نمونه های آزمون کشش بر اساس استانداردJIS Z2241-11 آماده سازی شد. همچنین مطالعه رفتار کششی فلز جوش در مورد نمونه های جوشکاری شده با تهیه نمونه از داخل فلز جوش انجام پذیرفت. اما با توجه به محدودیت ابعادی، این نمونه ها در ابعادی کوچکتر و بر اساس استانداردJIS Z2241-11 آماده سازی شدند که شکل(۱) طرحواره آن را نشان می دهد.

به منظور بررسی رفتار ضربه ای فلز پایه و فلز جوش، نمونه های ضربه ریزاندازه مطابق با استاندارد ASTM E23-06 تهیه شد. لازم به ذکر است با توجه به کاربرد فولادهای کم آلیاژی و لزوم داشتن خواص ضربه‌ای مناسب،

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

آزمون ضربه در دمای منفی بیست درجه سانتیگراد انجام گردید. دفعات تکرار آزمون کشش و ضربه برای هر کدام از نمونه ها سه مرتبه است. آزمون سختی سنجی فلز پایه و فلز جوش نمونه ها به روش سختی سنجی ویکرز و مطابق با استاندارد ASTM E92-82 و با دفعات تکرار سه مرتبه برای هر نمونه انجام پذیرفت.



شکل۱- طرحواره نمونه کشش فلز جوش (ابعاد به میلیمتر است).

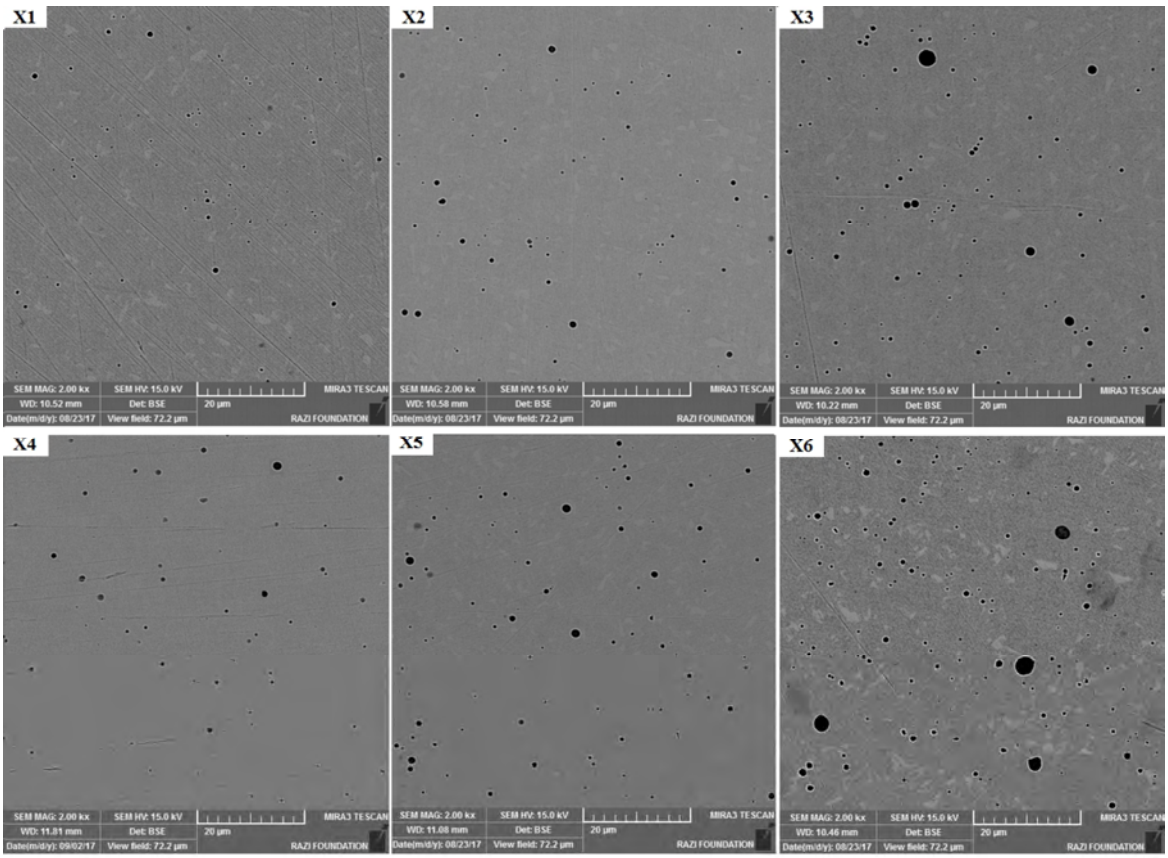
3- نتایج و بحث

تأثیر آخالها بر تحولات ریزساختاری در جوشکاری فولادهای کم آلیاژی وابسته به برخی از مشخصه های آخالها است که از آن جمله می توان به ترکیب شیمیایی، اندازه، شکل و توزیع آخالها اشاره کرد. شکل(۲) آخالهای تشکیل یافته در نمونه های جوشکاری شده در شرایط مختلف را نشان می‌دهد. به منظور بررسی ارتباط بین نوع آخالها و تشکیل فریت سوزنی شکل، ترکیب شیمیایی آخالهای تشکیل یافته در فلز جوش در شرایط مختلف جوشکاری با استفاده از EDS مطالعه شد که جدول (۶) متوسط ترکیب شیمیایی آخالهای تشکیل یافته را ارائه می دهد.مطالعه ترکیب شیمیایی آخالها در نمونه ها بیانگر این امر است که عناصر اکسیژن، آلومینیم، سیلسیم، منگنز به همراه مقادیری از تیتانیم به عنوان عناصر اصلی تشکیل دهنده آخالها در فلز جوش هستند. با توجه به نتایج جدول(۶) و همچنین آنالیز عنصری صفحه ای ارائه شده در شکل(۳) مشخص میگردد آخالهای تشکیل شده در نمونه های جوشکاری در شرایط مختلف از نوع آخالهای اکسیدی هستند و به دلیل میزان پایین گوگرد آخالهای سولفیدی و یا اکسی سولفیدی تشکیل نیافته اند. علاوه بر این، نتایج حاصل بیانگر عدم وجود آخالهای نیتریدی نیز است. با توجه به شکل(۳)، آخالهای اکسیدی تشکیل یافته در جوش از نوع آخالهای چند جزئی هستند که با توجه به میل ترکیبی بالای آلومینیم با اکسیژن انتظار می رود آخال اکسید آلومینیم به عنوان اولین آخال تشکیل یافته در فلز جوش باشد که می تواند این احتمال را بوجود آورد که در صورت مشاهده آخالهای چند جزیی در ساختار فلز جوش، هسته آخال از نوع اکسید آلومینیم بوده و پوششی از اکسید سایر عناصر نظیر منگنز، سیلسیم و یا تیتانیم بر روی آن تشکیل شده باشد.

مطالعات پیشین در زمینه ترکیب شیمیایی آخالها در جوشکاری زیرپودری فولادها [۷-۱۰] بیانگر این موضوع است که دو عامل اساسی تعیین کننده ترکیب شیمیایی آخالها در فلز جوش می باشد که عبارتند از: ترکیب شیمیایی فلاکس مورد استفاده و ترکیب شیمیایی فلز پایه.در مورد تأثیر ترکیب شیمیایی پودر مورد استفاده در این روش جوشکاری، می توان از معیار اندیس بازیسیته استفاده نمود که این معیار برای پودرهای مختلف مورد استفاده در این پژوهش در جدول(۴) ارائه شده است. با توجه به مقادیر بازیسیته ارائه شده مشخص می گردد هر سه نوع پودر مورد استفاده از نوع اسیدی با معیار بازیسیته مختلف می باشند. افزایش میزان بازیسیته یک پودر، میزان اکسیژن بوجود آمده را کاهش خواهد داد که این امر با مقادیر ارائه شده در جدول(۶) مطابقت دارد. اما این امر بیشتر از آنکه بتواند ترکیب شیمیایی آخالها را تحت تأثیر قرار دهد، با توجه به تأثیر بر مقدار اکسیژن تولید شده، میزان تشکیل آخالها را بیشتر تحت تأثیر قرار می دهد که این تغییر به دلیل اکسیدی بودن آخالهای موجود در فلز جوش می باشد.

با توجه به شکل(۲) مشاهده می گردد بدون توجه به شرایط جوشکاری تمامی آخالها شکل کروی داشته که شکل(۴) توزیع اندازه آخالهای تشکیل یافته در نمونه های جوش را نشان می‌دهد. همچنین جدول(۷) اندازه متوسط آخالها و کسر حجمی مربوط به این نمونه ها را ارائه می دهد. با توجه به نمودارهای توزیع اندازه مشاهده می گردد با افزایش حرارت ورودی توزیع اندازه آخالها به سمت آخالهای با اندازه بزرگتر تغییر یافته است به طوریکه درصد آخـــالهای با اندازه بزرگتر

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]



شکل۲- آخالهای تشکیل یافته در نمونه های جوش

افزایش پیدا کرده است که این امر به دلیل افزایش مدت زمان انجماد است و با نتایج مربوط به تحقیقات پارک و همکارانش مطابقت دارد [۱۱].

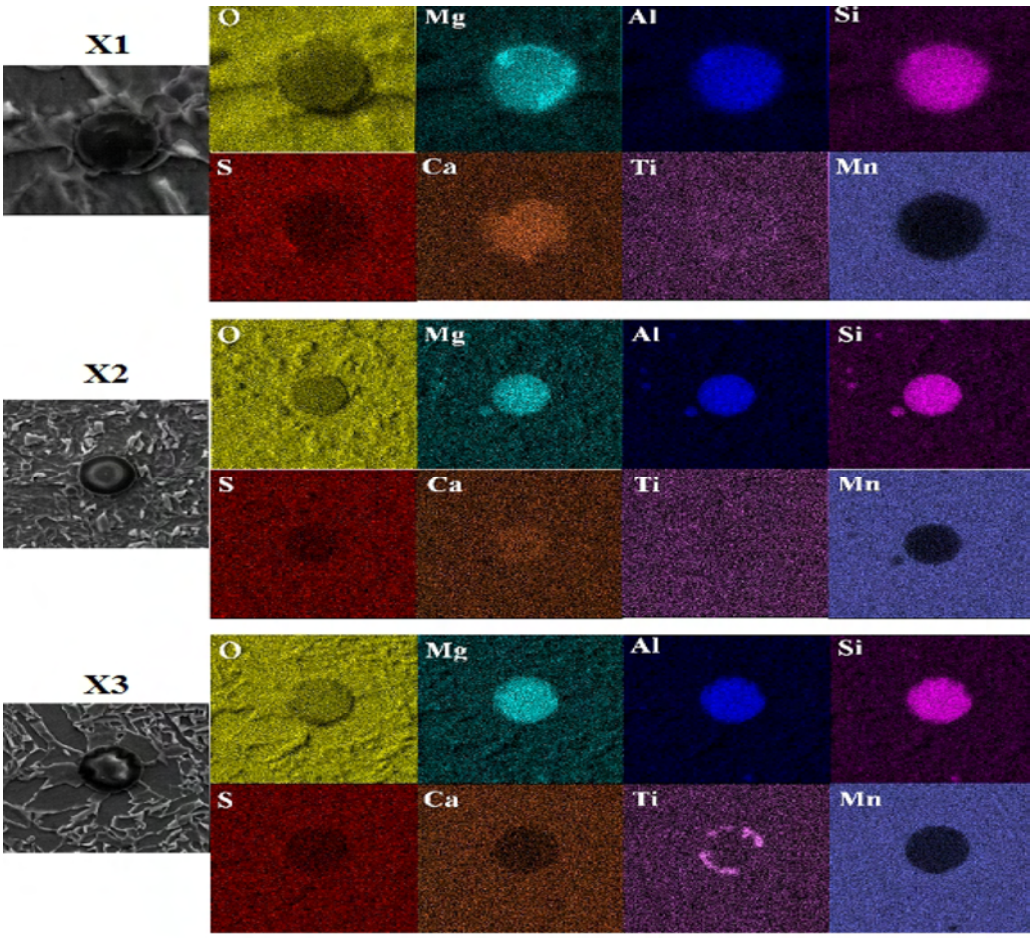
میزان آخالهای اکسیدی تشکیل یافته در هر نمونه در شرایط مشخص جوشکاری وابسته به نوع پودر جوشکاری مورد استفاده است. به شکلی که با افزایش میزان بازیسیته پودر مورد استفاده میزان اکسیژن تشکیل یافته کاهش یافته و در نتیجه میزان تشکیل آخال نیز کاهش یافته و کسر سطحی آن نیز کاهش خواهد یافت که با توجه به نتایج ارائه شده در جدول(۷) بیشترین کسر سطحی آخالها در هر دو سری مربوط به نمونه های ۳ و ۶ و کمترین کسر سطحی آخالها مربوط به نمونه های ۱ و ۴ است. همچنین افزایش اندازه متوسط آخالها به دلیل افزایش حرارت ورودی جوشکاری سبب افزایش کسر سطحی آخالها نیز می شود.

با توجه نتایج جدول(۷) مشخص می گردد با افزایش حرارت ورودی جوشکاری کسر سطحی آخالها افزایش یافته است که علاوه بر دلیل ذکر شده فوق، افزایش میزان تجزیه پودر جوشکاری و به تبع آن افزایش میزان اکسیژن ایجاد شده، سبب تسریع و افزایش تشکیل آخالها شده و کسر سطحی آخالها نیز افزایش پیدا خواهد کرد.

شکل(۵) ریزساختار فولاد مورد استفاده در این پژوهش را نشان می دهد. با توجه به این شکل، ریزساختار مربوط به فولاد API5L-X65 ترکیبی از دو فاز فریت و پرلیت است که ورقهای این فولاد در حالت نوردی مورد استفاده قرار گرفته است. لازم به ذکر است ریزساختار مربوط به فولاد فاقد هر نوع آخال بوده است.

شکل(۶) ریزساختار نمونه های جوشکاری شده در شرایط مختلف را نشان می دهد.درصد سطحی فریت سوزنی شکل تشکیل یافته در نمونه های جوشکاری شده در شرایط مختلف و خواص مکانیکی نمونه های یاد شده در جدول(۸) نشان داده

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]



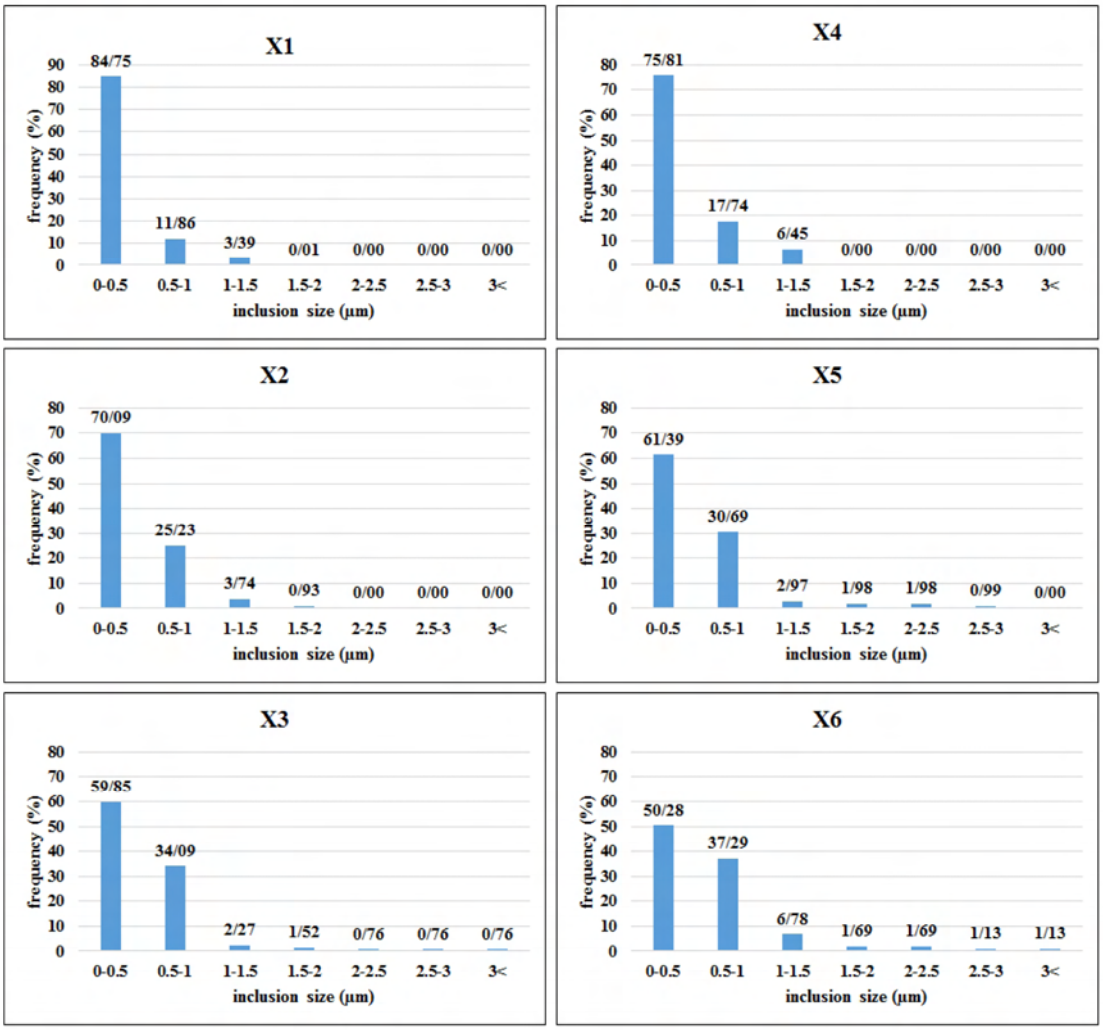
شکل۳- آنالیز عنصری صفحه ای آخالهای تشکیل یافته در ساختار جوش

جدول ۸- خواص مکانیکی نمونه ها

	فلز پایه	X1	X2	X3	X4	X5	X6
درصد فریت سوزنی شکل	۰	۴۲	۶۶	۸۲	۵۱	۷۴	۹۴
استحکام کششی (مگا پاسکال)	۵۶۸	۵۱۸	۵۸۱	۶۱۸	۵۴۷	۶۰۰	۶۴۳
ازدیاد طول (درصد)	۲۴	۱۵	۱۹	۲۳	۱۷	۲۱	۲۶
انرژی جذب ضربه در دمای C ۲۰- (ژول)	۱۰۸	۷۵	۹۸	۱۰۹	۸۷	۱۰۲	۱۱۶
سختی (ویکرز)	۱۷۵	۱۷۸	۲۱۵	۲۵۰	۱۹۸	۲۲۰	۲۴۲

شده است. با توجه به نتایج حاصل مشخص می گردد که عملکرد آخالها به عنوان مکانهای مرجح جوانه زنی فریت سوزنی شکل و بهبود ریزساختار و در نتیجه خواص مکانیکی برای نمونه هایX3 وX6 قابل مشاهده است و در بقیه شرایط جوشکاری بوجود آمدن آخالها به نحوی بوده است که میزان فریت سوزنی شکل کاهش یافته است و در نتیجه خواص مکانیکی فلز جوش در مقایسه با فلز پایه تضعیف شده است.بهبود خواص مکانیکی فلز جوش، بالاخص انرژی جذب ضربه فلز جوش، زمانی میسر میگردد که فریت سوزنی شکل بیشترین سهم را در ریزساختار فلز جوش داشته باشد و میزان کمی از فریت های مرزدانه ای و یا چند وجهی در ریزساختار تشکیل یابد. مورفولوژی این دو نوع فریت به گونه ای است که ساختار در هم تنیده ایجاد نکرده و رسد ترک تسهیل خواهد شد و سبب تضعیف خواص مکانیکی فلز جوش خواهد شد در صورتیکه تشکیل فریت سوزنی شکل به دو دلیل اساسی‌ایجاد ساختار ریزدانه وهمچنین مورفولوژی

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]



شکل۴- توزیع اندازه آخالهای تشکیل یافته در نمونه های جوش

در هم تنیده باعث بهبود خواص مکانیکی خواهد شد.بر اساس مطالعات انجام شده قبلی [۱۳-۱۵]، چهار فاکتور اصلی اندازه دانه آستنیت، سرعت سرمایش، ترکیب شیمیایی فلز جوش و آخالها بر تحول ریزساختاری تشکیل فریت سوزنی شکل و میزان تشکیل آن تأثیرگذارند که به منظور تحلیل ریزساختار فلز جوش نمونه های جوشکاری شده، درصد فریت سوزنی شکل تشکیل یافته و خواص مکانیکی حاصل، به صورت مجزا مورد بررسی قرار می گیرند.

3-1- تاثیر اندازه دانه آستنیت

در تحول ریزساختاری تبدیل آستنیت به فریت، تشکیل مورفولوژی‌هـای مختلف فریت وابسته به محـل جوانه زنی آن خواهد بود به طوریکه فریت مرزدانه ای و یا فریت ویدمن اشتاتن در مرزدانه ها و فریت سوزنی شکل در داخل دانه ها و بر روی آخالها جوانه زنی انجام خواهد داد. در نتیجه نسبت بین سطح مرزدانه های موجود و سطح آخالها فاکتوری تعیین کننده در بروز تحولات ریزساختاری خواهد بود که این فاکتور وابسته به اندازه دانه آستنیت و اندازه و کسر سطحی آخالها خواهد بود. بنابراین با افزایش اندازه دانه آستنیت و کاهش سطح مرزدانه ها، تحولات ریزساختاری غیرهمگن درون دانه‌ای نظیر تشکیل فریت سوزنی شکل تسهیل خواهد گردید که این امر بایستی با در نظر گرفتن اندازه آخالها و کسر سطحی آنها صورت پذیرد، چون افزایش اندازه دانه آستنیت فراینـدی است که وابستـه به حضور آخالهای با اندازه کوچکتر

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

جدول۹- ترکیب شیمیایی فلز جوش نمونه های جوش

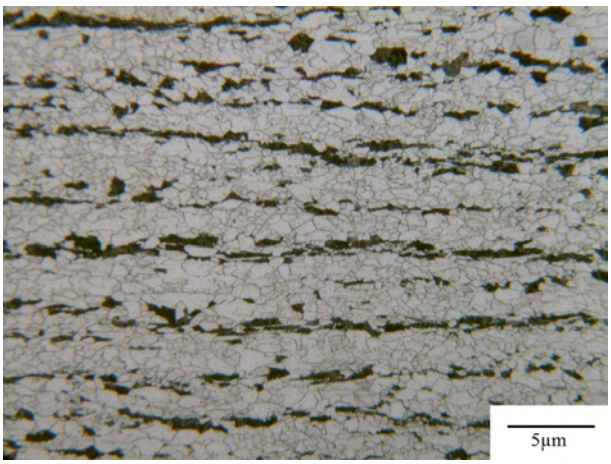
نمونه	درصد وزنی								
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Al	Ti	V	Fe
X1	۰/۹۰۱	۰/۳۶۱	۱/۶۳۰	۰/۰۴۹	۰/۰۳۱	۰/۰۲۴	۰/۰۱۴	۰/۰۰۵	Bal.
X2	۰/۰۸۵	۰/۷۲۰	۱/۷۰۵	۰/۰۴۹	۰/۰۳۳	۰/۰۱۲	۰/۰۱۲	۰/۰۰۶	Bal.
X3	۰/۱۲۴	۰/۶۶۰	۱/۵۰۰	۰/۰۵۱	۰/۰۳۰	۰/۰۵۳	۰/۰۳۵	۰/۰۰۷	Bal.
X4	۰/۱۰۰	۰/۳۸۳	۱/۶۵۰	۰/۰۵۰	۰/۰۳۱	۰/۰۲۵	۰/۰۱۵	۰/۰۰۶	Bal.
X5	۰/۰۹۴	۰/۶۹۱	۱/۷۰۰	۰/۰۵۰	۰/۰۳۲	۰/۰۱۲	۰/۰۱۳	۰/۰۰۶	Bal.
X6	۰/۱۱۷	۰/۶۷۰	۱/۵۹۰	۰/۰۵۲	۰/۰۳۰	۰/۰۵۴	۰/۰۳۵	۰/۰۰۷	Bal.

از ۰/۵ میکرومتر و کسر سطحی آنها می باشد. چون این نوع آخالها می توانند در مرز دانه های آستنیت قرار گرفته و تحرک مرز را کاهش داده و مانع از افزایش اندازه دانه آستنیت شوند [۱۶-۱۹]. بنابراین تاثیر اندازه دانه آستنیت بر ریزساختار نمونه‌های مختلف جوشکاری شده و خواص مکانیکی متناظر آنها از دو دیدگاه زیر قابل بررسی می باشد:

- میزان حرارت ورودی در نمونه هایX4،X5، X6در مقایسه با نمونه هایX1،X2، X3 بالاتر است که همین امر سبب افزایش اندازه دانه آستنیت گردیده (شکل ۷) به طوریکه متوسط اندازه دانه در نمونه X1 برابر با ۱۰ میکرومتر و در نمونه X4 برابر با ۲۰ میکرومتر است.با کاهش کسر سطحی مرزدانه ها، تحول ساختاری درون دانه ای تشکیل فریت سوزنی شکل را تسهیل نماید که نتایج ارائه شده در جدول(۸) نیز تأیید کننده این امر است که با افزایش حرارت ورودی جوش، درصد سطحی فریت سوزنی شکل افزایش یافته و از میزان فریت مرزدانه‌ای کاسته خواهد شد که همین امر سبب افزایش استحکام کششی و انرژی جذب ضربه نمونه ها خواهد شد .

- با توجه به اینکه آخالهای با اندازه کوچک می توانند با قرار گرفتن در مرزدانه ها مانع از افزایش اندازه دانه آستنیت شوند، بنابراین میزان این نوع آخالها در نمونه های مختلف جوشکاری میتواند تحولات ریزساختاری را تحت تأثیر قرار دهدکه شکل(۸) قرار گرفتن این نوع آخالها در مرز دانه دو نمونه جوشکاری شدهX1 وX4را نشان می دهد .

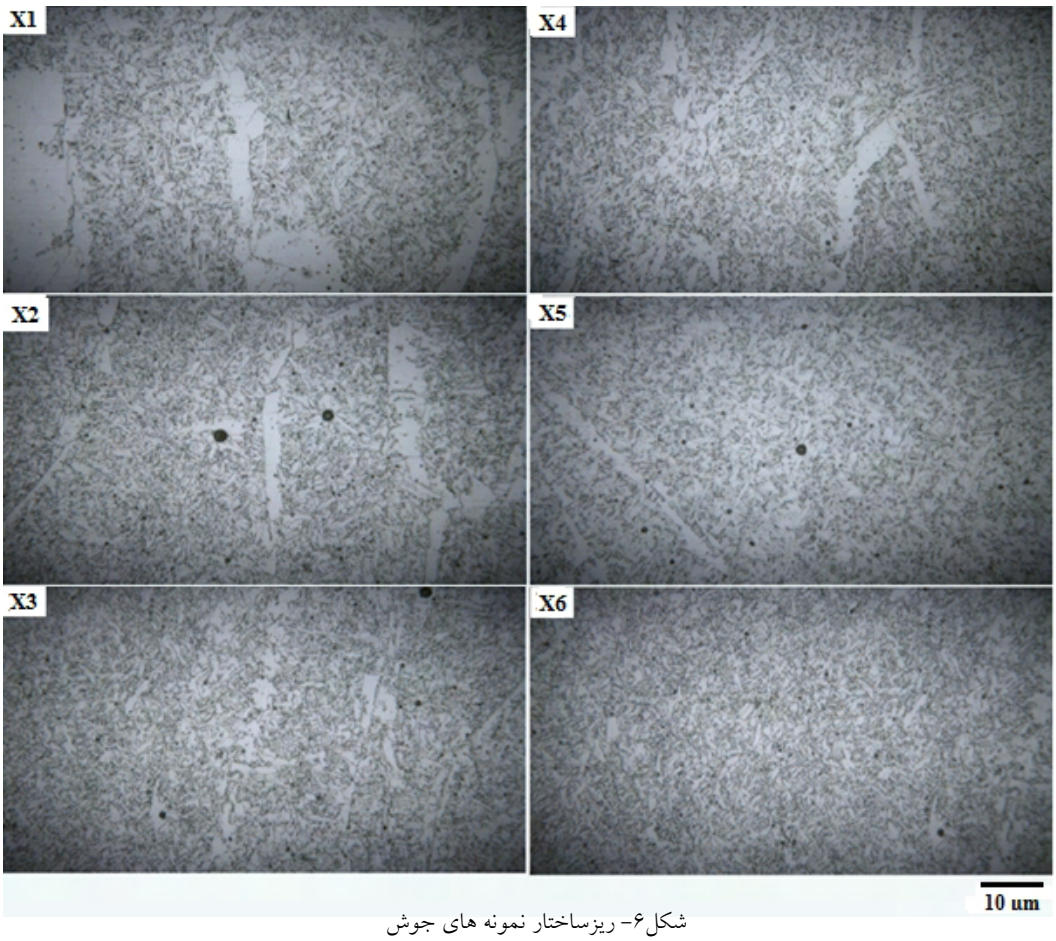
با توجه به نمودارهای شکل(۴)، بیشترین میزان آخالهای با اندازه کوچکتر از ۰/۵ میکرومتر مربوط به نمونه هایX1 وX4 است که به تدریج در بقیه نمونه ها از این میزان کاسته می‌شود.



شکل۵-ریزساختار فولاد X65 پایه

لذا با توجه به میزان بالای این آخالها انتظار میرود که بیشترین اثر ممانعت کنندگی آخالها از رشد دانه آستنیت در این دو نمونه صورت گیرد که با توجه به ریزساختارهای نشان داده شده در شکل(۶) میزان فریت مرزدانه ای در این دو نمونه نسبت به سایر نمونه ها بیشتر است که موجب کاهش خواص مکانیکی هر دو نمونه شده است. علاوه بر این با افزایش خاصیت ممانعت کنندگی این آخالها و جلوگیری از رشد دانه، سطح مرزدانه ها افزایش پیدا کرده و تحولات ریزساختاری مرزدانه ای را تسهیل خواهد نمود که با توجه به نتایج میزان فریت سوزنی شکل تشکیل یافته در ریزساختار کاهش پیدا خواهد نمود. به ترتیب در نمونه هایX2 ، X5وX3 ، X6از میزان آخالهای با اندازه کوچک کاسته شده است که باعث تقلیل خاصیت ممانعت کنندگی آخالها از رشد دانه شده و در نتیجه تحولات ریزساختاری درون دانه ای تسهیل گردیده و

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]



شکل۶- ریزساختار نمونه های جوش

درصد فریت سوزنی شکل تشکیل یافته در ریزساختار این نمونه ها افزایش یافته و سبب بهبود خواص مکانیکی این نمونه ها شده است.

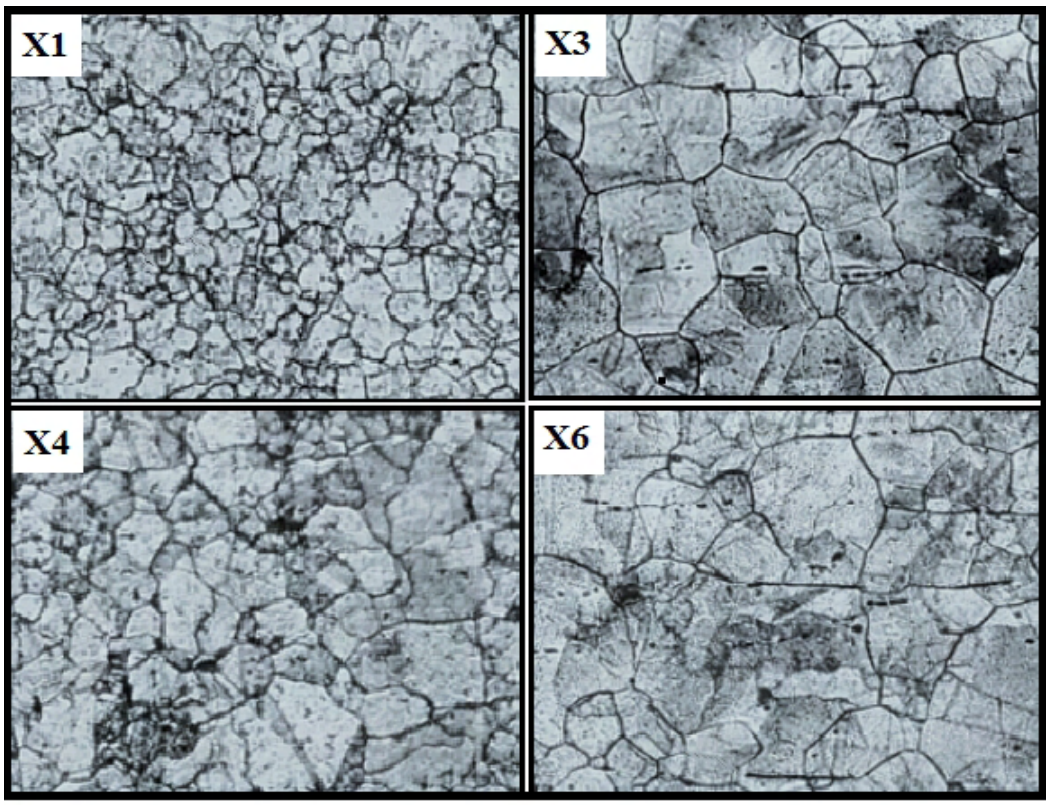
3-2- تاثیر سرعت سرمایش

شکل(۹) نمودار سرمایش نمونه های جوش را نشان می دهد که بیانگر بالاتر بودن سرعت سرمایش مربوط به نمونه های X1 تاX3 نسبت به نمونه هایX4 تا X6 است. در زمینه تشکیل ریزساختار فریت سوزنی شکل در فلز جوش، سرعت سرمایش به عنوان پارامتری به شمار می آید که عملکرد آن وابسته به وجود مکانهای مرجح جوانه زنی یعنی آخالها است. بطوریکه حتی با افزایش سرعت سرمایش در غیاب آخالها دستیابی به ریزساختار فریت سوزنی شکل مقدور نخواهد بود. علاوه بر این، تأثیر سرعت سرمایش در این نوع ریزساختارها مربوط به اندازه فـریت سـوزنی شکـل تشکیل یافته نیز خواهد بود که با افزایش سرعت سرمایش اندازه فریت سوزنی شکل تشکیل یافته کاهش خواهد یافت.

3-3- تاثیر ترکیب شیمیایی فلز جوش

جدول(۹) ترکیب شیمیایی فلز جوش نمونه های جوش را ارائه می دهد.ترکیب شیمیایی فلز جوش ایجاد شده در روش جوشکاری زیرپودری تابع سه عامل اصلی ترکیب شیمیایی فلز پایه، ترکیب شیمیایی فلز پرکننده و ترکیب شیمیایی فلاکس مورد استفاده است. تأثیر عناصر آلیاژی مختلف در ترکیب شیمیایی فلزجوش به دو شکل عناصر محلول جامد و عناصری که سبب بوجود آمدن آخال می گردند است. عناصر سیلیسیم، کروم، مولیبدن و نیکل به عنوان عناصر محلول جامد و عناصر تیتانیم، آلومینیم و وانادیم به عنوان عناصر ایجاد کننده آخال به شمار می آیند. دو عنصر کربن و منگنز تنها عناصری هستند که می توانند هر دو اثر عنوان شده فوق را اعمال نمایند [۲۰].

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

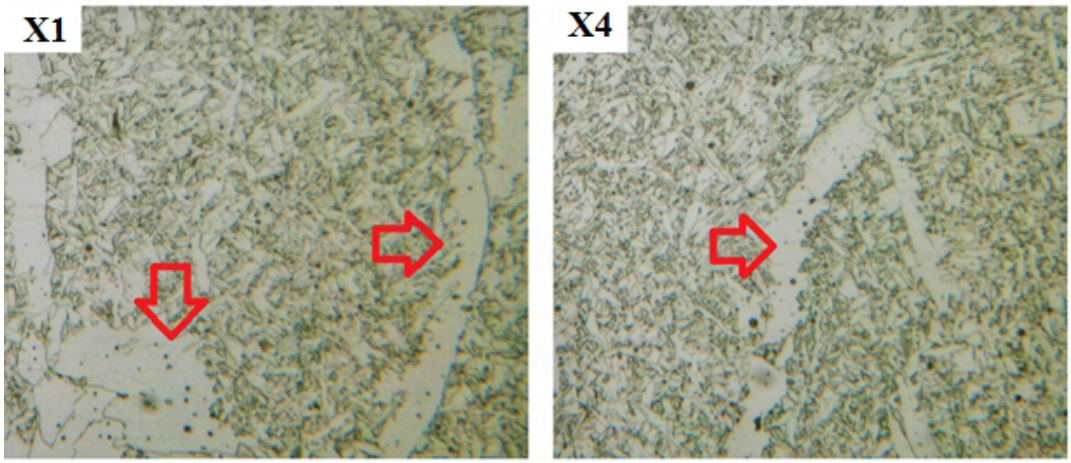


شکل ۷- تغییرات اندازه دانه آستنیت اولیه در نمونه های جوش

با توجه به نتایج، تغییرات میزان عناصر آلیاژی رفتار متفاوتی را نشان می دهد. تغییر میزان عناصر تیتانیم، آلومینیم و سیلسیم نشان دهنده ارتباط مستقیم میزان عناصر با ترکیب شیمیایی پودر جوشکاری مورد استفاده است. چون فلز پرکننده مورد استفاده فاقد دو عنصر آلومینیم و تیتانیم می باشد. تغییر میزان این دو عنصر آلیاژی بیانگر این موضوع است که با افزایش درصد وزنی اکسید تیتانیم و اکسید آلومینیم در پودر جوشکاری مورد استفاده، میزان این دو عنصر نیز در فلز جوش افزایش می یابد. همچنین با توجه به عدم وجود عناصر آلیاژی وانادیم، کروم و نیکل در پودرهای مورد استفاده و فلز پرکننده مصرفی، تغییر چندانی در میزان این عناصر در فلز جوش نمونه‌های مختلف در مقایسه با میزان این عنصر در فلز پایه، ایجاد نشده است. اما تغییرات مربوط به میزان عنصر منگنز که هم بصورت عنصر محلول جامد و هم با تشکیل آخال شناخته می‌شود مشابه موارد فوق نبوده و رفتاری متضاد با عناصری نظیر تیتانیم و یا آلومینیم دارد. به طوریکه بیشترین میزان درصد اکسید منگنز موجود در پودر جوشکاری مربوط به نمونه های X3 و X6 است، در صورتیکه ترکیب شیمیایی فلز جوش این دو نمونه حاکی از آن است که عنصر منگنز کمترین میزان را در مقایسه با سایر نمونه ها که پودر جوشکاری مورد استفاده برای آنها حاوی اکسید منگنز کمتری بوده را دارد.

میزان تغییر عنصر منگنز در فلز جوش نمونه های مختلف در ارتباط با تغییر در میزان تیتانیم موجود در فلز جوش آن نمونه‌ها می باشد به طوریکه با افزایش میزان تیتانیم از میزان عنصر منگنز کاسته شده است. با افزایش میزان تیتانیم در فلز جوش امکان بوجود آمدن آخالهای اکسید تیتانیم افزایش می یابد که این امر در نمونه هایX3 وX6که پودر جوشکاری مورد استفاده آنها بازیسیته ی پایینی دارد بسیار محتمل است. از سوی دیگر نتایج مطالعات اخیر [۲۰-۲۴]. نشان داده است آخالهای اکسید تیتانیمی جاذب عنصر منگنز هستند، بنابراین با افزایش میزان این آخالها میزان جذب عنصر منگنز نیز افزایش یافته و از میزان آن در فلز جوش کاسته می شود.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]



شکل۸- قرار گرفتن آخالهای با اندازه کوچک در مرزدانه های آستنیت در نمونه های X1 و X4.

بنابراین ریزساختار نمونه های مختلف جوشکاری شده و همچنین درصد فریت سوزنی شکل تشکیل یافته در نمونه های مختلف به صورت زیر قابل تحلیل می باشد:

-مطابق با مطالعه انجام شده قبلی [۲۵] با افزایش میزان کربن در فلز جوش، اندازه آخالهای تشکیل یافته در ساختار فلز جوش افزایش می یابد که این امر با نتایج حاصل از پژوهش حاضر مطابقت دارد. بنابراین با افزایش اندازه آخالهای تشکیل یافته در فلز جوش، میزان فریت سوزنی شکل تشکیل یافته در نمونه نیز افزایش می یابد.

-عنصر منگنز به عنوان عنصری پایدارکننده آستنیت به شمار می آید که با کاهش میزان آن در فلز جوش از پایداری آستنیت کاسته شده و امکان بروز تحول ریزساختاری تبدیل آستنیت به فریت افزایش می یابد که در صورت وجود مکانهای مرجح جوانه زنی سبب افزایش میزان فریت سوزنی شکل می گردد .

- افزایش میزان عنصر تیتانیم درصد آخالهای تیتانیمی را که به عنوان یکی از شناخته ترین محل های مرجح برای جوانه زنی فریت سوزنی شکل است را افزایش می دهد که این امر در مطالعات مختلف به اثبات رسیده است [۲۶ و ۲۷]. بنابراین با افزایش میزان تیتانیم میزان فریت سوزنی شکل تشکیل یافته در ساختار نیز افزایش پیدا خواهد کرد.

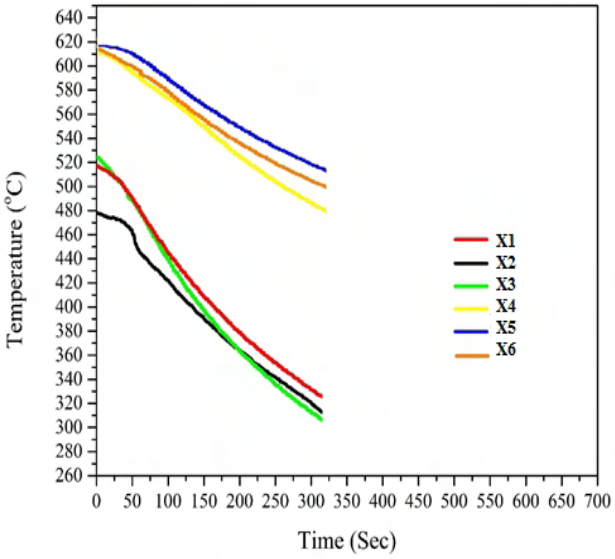
با توجه به این موضوع که در مقایسه نمونه های جوشکاری شده و با توجه به موارد فوق، نمونه های جوشکاری شدهX3 و X6دارای میزان کربن و تیتانیم بیشتری نسبت به سایر نمونه ها بوده و همچنین میزان عنصر منگنز موجود در فلز جوش آنها به نسبت سایر نمونه ها کمتر می باشد. بنابراین با توجه به اصول توضیح داده شده در مورد تأثیر عناصر آلیاژی مختلف بر تشکیل فریت سوزنی شکل، این دو نمونه دارای درصد فریت سوزنی شکل بیشتری نسبت به سایر نمونه ها خواهند بود که متناظر با آن خواص مکانیکی این دو نمونه در مقایسه با سایر نمونه ها بهتر خواهد بود که با نتایج ارائه شده در جدول(۸) همخوانی دارد.

3-4- تاثیر آخالها

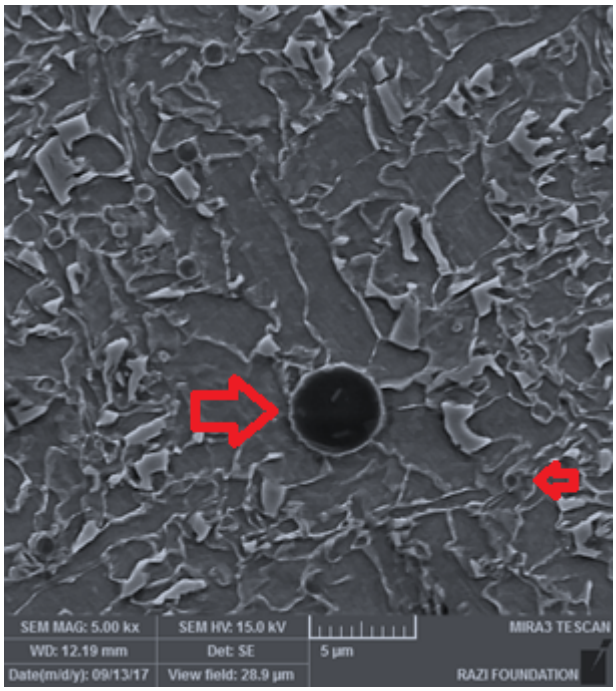
آخالها بر تشکیل ریزساختار فریت سوزنی شکل تاثیری دوجانبه دارند که از یک سو مکانهای مرجح برای جوانه زنی تأمین گردیده و باعث افزایش میزان فریت سوزنی شکل می‌گردد و از سوی دیگر در شرایط معین مانع از افزایش اندازه دانه آستنیت گردیده و سبب کاهش میزان فریت سوزنی شکل می شود. یکی از مهمترین مشخصه های آخالها که عملکرد آنها را به عنوان مکان مرجح جوانه زنی فریت سوزنی شکل تحت تأثیر قرارد می دهد، اندازه آخال است. افزایش اندازه آخالها به دلیل کاهش انرژی جوانه زنی و همچنین افزایش میزان میدان تنشی سبب تسهیل جوانه زنی فریت سوزنی شکل شده و میزان آنرا افزایش می دهد [۱۲و۲۷] که این امر در شکل(۱۰) نشان داده شده است بطوریکه آخال با اندازه بزرگتر به عنوان مکان جوانه زنی فزیت سوزنی شکل عمل نموده ولی آخالها با

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

اندازه کوچکتر به عنوان مکان مرجح جوانه زنی عمل ننموده‌اند.



شکل۹- نمودار سرد شدن نمونه های جوش



شکل۱۰- تأثیر اندازه آخال بر تشکیل فریت سوزنی شکل

بررسی نتایج حاصل از پژوهش حاضر بیانگر این موضوع است که بیشترین تأثیر آخالها به عنوان مکان مرجح جوانه زنی در یک بازه معین از اندازه آخالها صورت می گیرد. با توجه به نتایج حاصل قابل مشاهده است که آخالها با اندازه کمتر از ۰/۵ میکرومتر تأثیر مثبتی بر تشکیل فریت سوزنی شکل ندارد. این نوع آخالها نه تنها قابلیت ایجاد مکان مرجح جوانه زنی را نداشته بلکه با قرار گرفتن در مرزدانه ها و جلوگیری از رشد دانه آستنیت، تحولات ریزساختاری مرزدانه ای را تسهیل می‌نمایند و سبب کاهش میزان فریت سوزنی شکل می گردند. از سوی دیگر ریزساختارهای حاصله و همچنین خواص مکانیکی متناظر با آنها نشان می دهد آخالها با اندازه ۰/۵ تا ۱/۵ میکرومتر بیشترین تأثیر را بر روی تشکیل فریت سوزنی شکل دارند و می توان این بازه اندازه را به عنوان بازه اندازه آخال بهینه جهت کنترل ریزساختار و تشکیل فریت سوزنی شکل در نظر گرفت.

دومین مشخصه تأثیرگذار آخالها بر تشکیل فریت سوزنی شکل، میزان آخالهای تشکیل یافته در ساختار فلز جوش است که این مشخصه به عنوان یک مشخصه وابسته به شمار می رود و وابستگی ان به اندازه آخالهای تشکیل یافته است. بطوریکه افزایش درصد آخالهایی که اندازه آنها در بازه اندازه بهینه قرار دارد سبب افزایش میزان فریت سوزنی شکل تشکیل یافته و بهبود خواص مکانیکی خواهد شد که این امر در نتایج پژوهش حاضر قابل مشاهده است که با افزایش درصد آخالهایی با اندازه بین ۰/۵ تا ۱/۵ میکرومتر درصد فریت سوزنی شکل تشکیل یافته در ریزساختار فلز جوش افزایش یافته که همین امر باعث افزایش میزان استحکام کششی، انرژی جذب ضربه فلز جوش و سختی ناحیه جوش شده است.افزایش میزان آخالها با اندازه ی خارج از اندازه بهینه دو اثر زیر را در پی می‌تواند داشته باشد:

- افزایش میزان آخالهای با اندازه کوچکتر از اندازه بهینه نه تنها باعث تأمین مکان مرجح جوانه زنی نمی گردد، بلکه با محدود ساختن تحرک مرزدانه ای، تحولات مرزدانه ای را تسهیل می کند.
- افزایش میزان آخالهای با اندازه بزرگتر از اندازه بهینه نه تنها نرخ تشکیل فریت سوزنی شکل را به شدت کاهش دهد، بلکه می تواند محل مرجحی برای جوانه زنی حفرات عمل نموده و خواص مکانیکی را تضعیف نماید.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

4- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر اثر تغییر مشخصه های آخالهای بوجود آمده در جوشکاری زیرپودری فولاد کم آلیاژیAPI5l-X65 ، بر تشکیل ریزساختار فریت سوزنی شکل مورد مطالعه قرار گرفته است که اهم نتایج حاصل به صورت زیر است:

-اندازه آخالها مستقل از نوع پودر جوشکاری مورد استفاده، صرفا وابسته به حرارت ورودی جوشکاری است و با افزایش آن اندازه آخال نیز افزایش می یابد.

-درصد آخالهای تشکیل یافته در فلز جوش وابسته به اندیس بازیسیته پودر جوشکاری مورد استفاده است است، به طوری که افزایش بازیسیته درصد آخالها کاهش می یابد

-تغییرات میزان عناصر آلیاژی در ترکیب شیمیایی فلز جوش نمونه های مختلف جوشکاری رفتار متفاوتی را نشان می دهد بطوریکه تغییر میزان عناصر تیتانیم، آلومینیم و سیلیسیم نشان دهنده ارتباط مستقیم میزان عناصر با ترکیب شیمیایی پودر جوشکاری مورد استفاده است. اما تغییرات مربوط به میزان عنصر منگنز که هم به عنوان عنصر محلول جامد و هم عنصر با قابلیت بوجود آوردن آخال شناخته می شود مشابه موارد فوق نبوده و رفتاری متضاد با عناصری نظیر تیتانیم و یا آلومینیم دارد.

-عملکرد آخالها به عنوان مکانهای مرجح جوانه زنی فریت سوزنی شکل و بهبود ریزساختار و در نتیجه خواص مکانیکی برای نمونه هایX3 وX6 قابل مشاهده است و در بقیه شرایط جوشکاری بوجود آمدن آخالها به نحوی است که میزان فریت سوزنی شکل کاهش یافته است و در نتیجه خواص مکانیکی فلز جوش در مقایسه با فلز پایه تضعیف شده است.

منابع

1-Bol'shakov. V, Sukhomlin. G, Kuksenko. V, "Investigation of the Fine Structure of Acicular Ferrite. Part 2", Metal Science and Heat Treatment, Vol. 51, pp. 461-466, 2009.

2-Bhole. S, Nemade. J, Collins. L, Liu. C, "Effect of Nickel and Molybdenum Additions on Weld Metal Toughness in a Submerged Arc Welded HSLA Line-Pipe Steel", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 173, pp. 92-100, 2006.

3-Kou. S, Welding Metallurgy, A John Wiley& SonsPublication, 2002.

4- Lippold. J. C, Welding metallurgy and weldability, John Wiley & Sons, 2014.

5-Phillips. D. H, Welding Metallurgy of Stainless Steels, Welding Engineering: An Introduction, John Wiley & Sons, 2015.

6-Jiang. Q, Li. Y, Wang. J, Zhang. L, "Effects of Inclusions on Formation of Acicular Ferrite and Propagation of Crack in High Strength Low Alloy Steel Weld Metal", Materials Science and Technology, Vol. 27, pp. 1565-1569, 2011.

7-Farrar. R, "Role of Inclusions in the Ductile Fracture of Weld Metals", Welding and Metal Fabrication, Vol. 44, pp. 578-581, 1976.

8-Davis. M, Coe. F, The chemistry of submerged arc welding fluxes, Welding Institute,1977.

9- Lau. T,Weatherly. G, McLean. A, "The Sources of Oxygen and Nitrogen Contamination in Submerged Arc Welding Using CaO-Al2O3 Based Fluxes", Welding Journal, Vol. 64, pp. 343-347, 1985.

10-Lau. T, Weatherly. G, McLean. A, "Gas/Metal/Slag Reactions in Submerged Arc Welding Using CaO-Al2O3 Based Fluxes", Welding Journal, Vol. 65, pp. 343-347, 1986.

11-Park. K. T, Hwang. S. W, Ji. J. H, Lee. C. H, "Inclusions Nucleating Intragranular Polygonal Ferrite and Acicular Ferrite in Low Alloyed Carbon Manganese Steel Welds", Metals and Materials International, Vol. 17, pp. 349-356., 2011.

12-Bhadeshia. H, Bainite in Steels–Transformation, Microstructure and Properties, Institute of Materials, Carlton House Terrace, London, 2001.

13-Farrar. R, Harrison. P, "Acicular Ferrite in Carbon-Manganese Weld Metals: an overview", Journal of Materials Science, Vol. 22, pp. 3812-3820, 1987.

14-Loder. D, Michelic. S, "Systematic Investigation of Acicular Ferrite Formation on Laboratory Scale", Materials Scienceand Technology, Vol. 33, pp. 162-171, 2017.

15--Sarma. D. S, Karasev. A, Jönsson. P, "On the Role of Non-Metallic Inclusions in the Nucleation of Acicular Ferrite in Steels", ISIJ International, Vol. 49, pp. 1063-1074, 2009.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

16-Reiter .J, Bernhard. C, Presslinger. H, "Austenite Grain Size in the Continuous Casting Process: Metallographic Methods and Evaluation", Materials Characterization, Vol. 59, pp. 737-746, 2008.

17-Adrian. H, Pickering. F, "Effect of Titanium Additions on Austenite Grain Growth Kinetics of Medium Carbon V–Nb Steels Containing 0• 008–0• 018% N", Materials Science and Technology, Vol. 7, pp. 176-182,1991.

18-Andersen. I, Grong. Ø, "Analytical Modelling of Grain Growth in Metals and Alloys in the Presence of Growing and Dissolving Precipitates—I. Normal Grain Growth", ActaMetallurgica et Materialia, Vol. 43, pp. 2673-2688, 1995 .

19-Barbaro. F, Krauklis. P, Easterling. K, "Formation of Acicular Ferrite at Oxide Particles in Steels", Materials Science and Technology, Vol. 5, pp. 1057-1068, 1989.

20-Loder. D, Michelic. S. K, Bernhard. C, "Acicular Ferrite Formation and Its Influencing Factors-A Review", Journal of Materials Science Research, Vol. 6, pp. 24-43, 2016.

21-Loder. D, Michelic. S. K, Bernhard. C, "Acicular Ferrite Formation and Its Influencing Factors-B Review", Journal of Materials Science Research, Vol. 7, pp. 34-53, 2016.

22-Wan. X, Wang. H, Cheng. L, Wu. K, "The Formation Mechanisms of Interlocked Microstructures in Low-Carbon High-Strength Steel Weld Metals", Materials Characterization, Vol. 67, pp. 41-51, 2012.

23-Huang. Q, Wang. X, Jiang. M, Hu. Z, Yang. C, "Effects of Ti–Al Complex Deoxidization Inclusions on Nucleation of Intragranular Acicular Ferrite inC–Mn Steel", Steel Research International, Vol. 87, pp. 445-455, 2016.

24-Cai. Z, Zhou. Y, Tong. L, Yue. Q, Kong. H, "Effect of Ti-Al-O Inclusions on the Formation of Intragranular Acicular Ferrite", Materials Testing, Vol. 57, pp. 649-654, 2015.

25-Mu. W, Mao. H, Jönsson. P. G, Nakajima. K, "Effect of Carbon Content on the Potency of the Intragranular Ferrite Formation", Steel Research International, Vol. 87, pp. 311-319, 2016.

26-Ilman. M, Cochrane. R, Evans. A, "The Development of Acicular Ferrite in Reheated Ti–B–Al–N-Type Steel Weld Metals Containing Various Levels of Aluminium and Nitrogen", Welding in the World, Vol. 59, pp. 565-575, 2015.

27-Vanovsek. W, Bernhard. C, Fiedler. M, Schnitzer. R, "Effect of Titanium on the Solidification and Postsolidification Microstructure of High-Strength Steel Welds", Welding in the World, Vol. 57, pp. 665-674, 2013.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]