علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال دوم، شماره ۱، بهار و تابستان ۹۵، صفحه ۶۸-۵۷

# تاثیرگرمای ورودی بر ریزساختار و خواص مکانیکی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی فولاد کم آلیاژ استحکام بالاHSLA-X60

**امیر بهجت*، مرتضی شمعانیان ، مسعود عطاپور ، سیدمحمد اهل سرمدی**

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۱۲/۱۳ ؛ دریافت نسخهٔ نهایی: ۱۳۹۵/۰۳/۱۱)

**چکیده**

در این پژوهش به ارزیابی ریزساختاری و ارزیابی خواص مکانیکی مقطع جوش اصطکاکی اغتشاشی فولاد کم آلیاژ با استحکام بالا X-60 توسط میکروسکوپ نوری وآزمون کشش و ریزسختی پرداخته شده است. هدف اصلی این بررسی برقراری ارتباط بین پارامترهای جوشکاری با خواص مقطع جوش بود به طوریکه جوشکاری با سرعت های چرخشی و خطی مختلف انجام شد. یافته‌های پژوهشی نشان داد تغییر پارامترهای جوشکاری و در نتیجه آن، تغییر درگرمای ورودی حین جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی تاثیر زیادی بر دمای بیشینه و نرخ سرد شدن داشته که موجب ایجاد ریزساختارهای فریتی و بینیتی در منطقه جوش شده که این تغییرات ریزساختاری موجب افزایش استحکام تسلیم از 370MPa به میانگین420MPa شد. همچنین انجام فرایند اصطکاکی اغتشاشی باعث افزایش سختی از ۲۲۰ ویکرز به میانگین ۲۸۰ ویکرز و توزیع یکنواخت آن در مقطع جوش شده است. حضور دیمپل ها در تصاویر حاصل از شکست نگاری حاکی از شکست نرم در اثر فرایند اصطکاکی اغتشاشی می باشد.

**کلمات کلیدی:** فولاد کم‌آلیاژ استحکام بالاX-60 ، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، جوشکاری حالت جامد، منطقه متاثر از حرارت، نرخ سردشدن.

# Effect of heat input on microstructure and mechanical properties in friction stir welding of HSLA-60

**A.Behjat, M.Shamanian, M.Atapour, M.Ahl Sarmadi**

Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan 84156-83111, Iran

(Received 3 March 2016 ; Accepted 24 May 2016)

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی A.behjat@ma.iut.ac.ir

[ Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-02 ]

**Abstract**

High-strength low alloy steels are a class of steels used in applications that require high strength and good weldability, including ship hulls, gas pipelines and oil industry. One way to build parts is fusion welding that create areas with a large grain size in the heat-affected zone and increased susceptibility to hydrogen cracking. One way to solve this problem is to use solid state friction stir welding process. In this study, microstructural evaluation and mechanical properties of friction stir welding X-60 cross sections examined by optical microscope and by tensile and micro-hardness tests. The results indicate that changing welding parameters and thereby, change the heat input during friction stir welding have a great impact on maximum temperature and cooling rate that cause creating ferrite and bainitic ferrite in the weld zone. This change in microstructure of weld zone cause to improve mechanical properties that increase yield strength from 380 MPa to 420 MPa .Also, the friction stir process cause increasing hardness of 220 Vickers to an average of 280 Vickers and uniform distribution of hardness in the cross-section of friction stir joints.

**Keywords:** High Strength Low Alloy Steel X60, Friction Stir Welding, Solid State Welding, Heat-Affected Zone, Cooling Rate.

**۱- مقدمه**

امروزه یکی از مهمترین آلیاژهای آهنی، فولادهای کم آلیاژ با استحکام بالا (HSLA) است که بسیار مورد توجه قرار گرفته است. از کاربردهای فولادهای HSLA می‌توان به استفاده آن در خطوط انتقال نفت و گاز، اجزای وسایل نقلیه سنگین، ماشین‌های کشاورزی و ساخت و ساز، تجهیزات صنعتی، مخازن تحت فشار و... نام برد. انتخاب یک فولاد HSLA مشخص، وابسته به ویژگی‌های کاربردی آن مثل مقاومت به خوردگی، شکل‌پذیری، جوش‌پذیری و امکان کاهش ضخامت می‌باشد[۱]. معمولا این فولادها توسط فرآیند ترمومکانیکال‌کنترل شده(TMCP) تولید می‌شود و اضافه کردن برخی از عناصرکاربیدزا و نیتریدزا قوی مثل تیتانیوم، وانادیوم و نیوبیوم، موجب بهبود رفتار تغییر فرم، افزایش استحکام و چقرمگی آنها شده است. این عناصر با ایجاد رسوب در مرزدانه‌ها، مانع تبلور مجدد در حین نورد گرم و بزرگ شدن دانه های آستنیت شده و در ادامه سرد شدن فولاد پس از نورد، موجب ایجاد ساختار فریت ریزدانه همراه با جزایر بینیتی می‌شود [۱و۲].

یکی از روش‌های ساخت و تولید قطعات، استفاده از فرآیندهای جوشکاری بوده که امروزه عمدتا به صورت ذوبی انجام می‌شود. در جوشکاری ذوبی، زمانی‌که گرمای ورودی ناشی از جوشکاری زیاد باشد، در منطقه متاثر از حرارت(HAZ) در اثر بزرگ شدن دانه‌های آستنیت و حل شدن رسوبات استحکام بخش و رسوب مجدد آنها در مرزدانه های نواحی با اندازه دانه بزرگ، منجر به کاهش استحکام و چقرمگی جوش شده است[۳]. در موارد خاص، حل شدن رسوبات نیتریدی منجر به آزاد شدن نیتروژن در زمینه و ایجاد فازهای ترد و درون‌دانه‌ای و در نتیجه کاهش چقرمگی دمای پایین در HAZ شده است. علاوه بر آن جوشکاری ذوبی فولادهای HSLA موجب ایجاد ساختار مارتنزیتی در منطقه متاثر از حرارت که موجب افزایش حساسیت به ترک خوردن هیدروژنی،کاهش چقرمگی و افت خواص مکانیکی جوش می‌شود [۱و۴].

امروزه تحقیقات پژوهشگران به سمتی پیش رفته که از روش‌های جوشکاری با گرمای ورودی کمتر و جوشکاری حالت جامد جهت جوش مواد استفاده شود. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی(FSW) در زمرهٔ فرایند های جوش حالت جامد می باشد که در موسسه جوشکاری انگلستان (TWI) و توسط وین توماس اختراع شد و گسترش این فرآیند توسط لاکهید مارتین در سال ۱۹۹۵ صورت گرفت [۵]. امروزه به طور گسترده از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی جهت اتصال آلیاژهای آلومینیومی که نقطه ذوب پایین داشته و با روش‌های

[ Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-02 ]

ذوبی قابل جوشکاری نیستند، استفاده شده است. در سال‌های اخیر، با توسعه و گسترش ابزار جوشکاری که بتواند دمای بالا و تغییر فرم پلاستیکی شدید را در حین جوشکاری تحمل کند امکان جوشکاری FSW برخی از آلیاژهای پایه آهنی فراهم شده و مورد توجه محققین قرار گرفته است[۶-۸].

تفاوت اصلی بین فرایند FSW و جوشکاری ذوبی در دمای اتصال است به گونه‌ای که جوشکاری FSW در حالت جامد و زیر نقطه ذوب ماده مورد نظر موجب اتصال می‌گردد. دما در FSW تا حدی بالا می‌رود که تغییر فرم پلاستیکی شدید و سیلان ماده به راحتی بتواند انجام شود. فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در مقایسه با جوشکاری ذوبی جدید بوده و مزیت‌های متفاوتی نسبت به جوش قوسی فولادهای کم آلیاژ با استحکام بالا دارد به طوریکه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، خواص مکانیکی قابل قبولی را ایجاد می‌کند و منجر به کاهش پیچیدگی در قطعه جوشکاری شده است [۴-۶].

در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی گرمای ورودی یک پارامتر تاثیرگذار با ساختار جوشکاری شده است که خود به سرعت پیشروی و سرعت چرخشی وابسته است. هر چه میزان گرمای ورودی به منطقه جوش زیاد باشد، دمای بیشینه در نمونه افزایش یافته و در مقابل سرعت سرد شدن کاهش می یابد[۴]. اثر متقابل بین دمای بیشینه و سرعت سرد شدن بر روی سختی‌پذیری و ایجاد فازهای مختلف در فولاد مثل بینیت، مارتنزیت و فریت اثر گذاشته و باعث ایجاد ریزساختار متفاوت در منطقه جوش شده است. با زیاد شدن نسبت سرعت چرخشی به سرعت پیشروی، گرمای ورودی به عنوان یک پارامتر موثر اندیس گرما، افزایش یافته که موجب افزایش اندازه دانه فریت و تیغه های بینیتی در ساختار جوش می‌شود و همچنین موجب بزرگ شدن پهنای منطقه اغتشاش یافته و ناحیه متاثر از حرارت شده است [۶-۸].

جهت درک تحولات ریزساختاری جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی فولادهایHSLA باید تاثیر پارامترهای جوشکاری بر تشکیل فاز آستنیت و استحاله تبدیل آن به ریزساختارهای متفاوت مورد بررسی قرار گیرد. تحقیقات انجام شده توسط لینرت بر روی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی فولاد معمولی [۷]، اوزکین بر روی فولادهای X80,L80 [۹]، مشخص شده که مقطع جوش داده شده توسط جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی دارای خواص مکانیکی قابل قبولی بوده به طوری‌که نرم‌ترین منطقه در ناحیه متاثر از حرارت به خاطر فراتمپرشدن ساختار فلز پایه گزارش شده است.

در بررسی موضوع مقایسه بین جوش ذوبی زیر پودری و جوش FSWفولاد HSLA-65، تحقیقاتی توسط کونکال و همکاران انجام شده است. نتایج بدست آمده مشخص می‌کند که جوشکاری FSW توسط ابزار W-Re دارای خواص مکانیکی قابل قبول و بهتر از جوش ذوبی است[۳و۴]. بررسی انجام شده توسط لینگیون وی و همکاران ارتباط بین پارامترهای متغیر جوشکاری با ریزساختار خاصل از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی فولاد HSLA-65 بیانگر آن است که با افزایش گرمای ورودی، ریزساختاراز بینیت به سمت فریت چندوجهی تغییر پیدا کرده و زمانی که گرمای ورودی خیلی زیاد شود، علاوه بر محصولات حاصل از استحاله در دمای بالا شامل فریت سوزنی وفریت هم‌محور، به علت بزرگ شدن دانه‌های آستنیت قبلی امکان ایجاد ساختار بینیت پرشکل همراه با ذرات ریز رسوب در مرزدانه دانه‌های قبلی آستنیت نیز وجود دارد[۱۰]. با توجه به کاربرد وسیع فولادهای میکروآلیاژی در صنایع مهندسی و لزوم جوشکاری قطعات فولادی، در این پژوهش به بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی مقاطع جوش داده شده فولاد X-60 و بررسی تاثیر پارامترهای جوشکاری پرداخته شده است.

## ۲- روش تحقیق

در این تحقیق از فولاد میکروآلیاژی استحام بالاX-60 با ضخامت ۳ میلی متر استفاده شد. ترکیب شیمیایی فلز مورد استفاده به روش کوانتومتری تعیین شده و در جدول ۱ آمده است. عملیات سنگ زنی قبل از جوشکاری توسط دستگاه سنگ مغناطیسی به منظور از بین بردن اعوجاج در سطح قطعه انجام پذیرفت و نمونه ها در اندازه های $150\times60\times3\ mm^3$

[ Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-02 ]

جدول۱- مقادیر عناصر موجود در فولادX-60 مورد استفاده در این پژوهش

| عناصر | C | Si | Mn | P | S | V | Nb | Ti | Fe |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| درصد | ۰/۱۶ | ۰/۴۵ | ۱/۶۵ | ۰/۰۲ | ۰/۰۱ | ۰/۰۸ | ۰/۰۵ | ۰/۰۲ | پایه |

جدول۲- متغیرهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

| شماره نمونه | کد نمونه | سرعت چرخش $\omega$ (rev/min) | سرعت پیشروی $v$(mm/min) | $\frac{v}{\omega}$(mm/rev) |
|---|---|---|---|---|
| ۱ | FSW 700-60 | ۷۰۰ | ۶۰ | ۰/۰۸۵ |
| ۲ | FSW 1000-40 | ۱۰۰۰ | ۴۰ | ۰/۰۴ |
| ۳ | FSW 1000-60 | ۱۰۰۰ | ۶۰ | ۰/۰۶ |

آماده سازی شدند. قبل از شروع فرایند، به منظور زدودن آلودگی و چربی از سطح ورق ها، سطح هر دو ورق را با محلول استون تمیز شدند. جوشکاری توسط ابزار کاربید تنگستن مولیبدن دار(WC-Mo) با قطر شانه ۱۸ میلی متر و ارتفاع پین ۲ میلی متر به صورت مخروطی با اقطار ۵ و ۴ میلی متر انجام شد. جوشکاری در سرعت های چرخش ۷۰۰ و۱۰۰۰ دور بر دقیقه، سرعت های پیشروی ۴۰ و۶۰ میلی متر بر دقیقه و با زاویه $3^{o}$ درجه ای ابزار نسبت به قطعه کار انجام شد(جدول۲). جهت بررسی ریزساختار، ابتدا از مقطع عرضی جوش نمونه جدا گردید. پس از آن نمونه ها بعد از سنباده زنی از سنباده ۱۲۰ تا ۴۰۰۰، پولیش با خمیر الماس و اچ با محلول۲٪ نایتال، توسط میکروسکوپ نوری مورد ارزیابی قرار گرفتند. بررسی رفتار ریزسختی مقطع جوش توسط دستگاه ریزسختی کاپا با بار اعمالی ۳۰۰ گرم و فواصل ۲ میلیمتر انجام شد. هم چنین رفتار مکانیکی توسط آزمون کشش به صورت عرضی مورد بررسی قرار گرفت. لازم به ذکر است که استحکام تسلیم و نهایی فولاد X-60 به ترتیب برابر ۴۱۰ و ۵۲۰ مگاپاسکال است. بررسی رفتار سطح شکست نیز بعد از آزمون کشش توسط میکرسکوپ الکترونی(SEM7 انجام گرفت.

## ۳- نتایج و بحث

### ۳-۱- بررسی ریزساختار

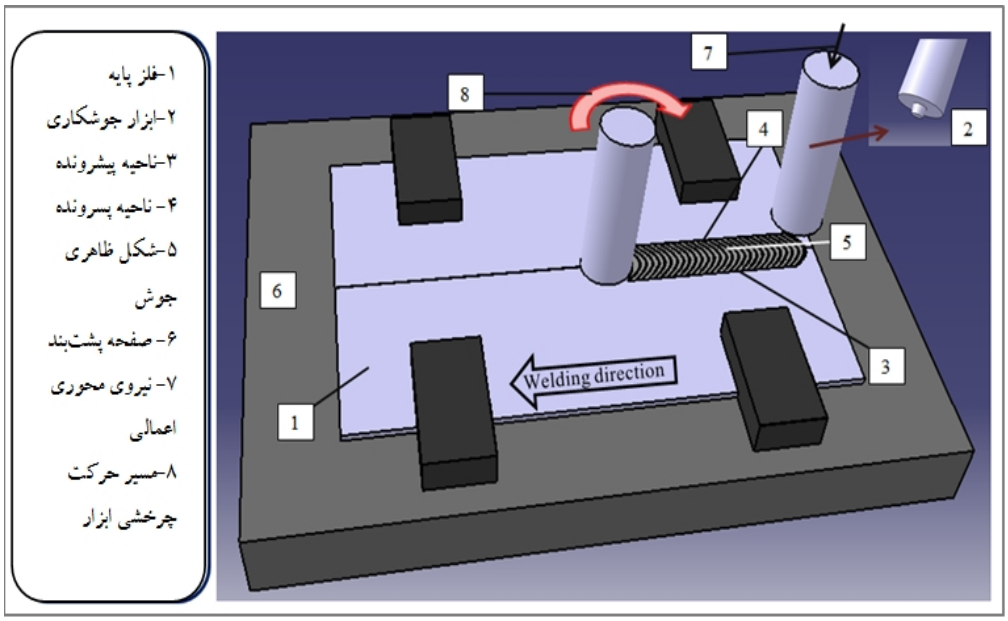
همانگونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود ریز ساختار فولاد X-60 متشکل از دانه های فریتی، کولونی های پرلیتی و باندهای کشیده شده است. باندهای فریتی پرلیتی در فولادهای کربنی همراه با جدایش عناصر آلیاژی جانشین موجب افزایش یا کاهش دمای تشکیل فریت پرویوتکتویید ($Ar_3$) می شود. جدایش در حین انجماد فولاد رخ داده و در هنگام نورد این فازها کشیده میشوند. اگر دمای ($Ar_3$) توسط محلول افزایش یابد فریت پرویوتکتویید در نواحی با غلظت بالا جوانه زنی می کند. از طرف دیگر اگر دمای($Ar_3$) کاهش یابد، جوانه زنی فریت پرو از نواحی با غلظت پایین آغاز می گردد. در هر دو مورد اتم های کربن از فریت پرویوتکتویید پس زده شده و مناطق پر کربنی در آستنیت ایجاد می نمایند که در نهایت تبدیل به پرلیت می شوند. لازم به ذکر است که باندهای پرلیتی مناطق مستعدی برای جوانه زنی و رشد ترک هستندبه همین خاطر در فولاد های HSLA زیر دمای تبلور مجدد نورد شده که این امر موجب ایجاد فریت ریزدانه و ساختار کشیده شده می‌گردد[۱و۲].

ریزساختار مقطع جوش FSW 1000-60 در شکل ۳ آمده است. ریزساختار ورق‌های نورد شده معمولی و نرمالـه شده دارای پرلیت-های نسبتا ریزی است که درون زمینه فریت هم‌محور قرار دارند. ریز ساختار ایجاد شده پس از جوشکاری تابعی از سیکل های حرارتی و مکانیکی ایجاد شده در حین جوش

[ Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-02 ]

جدول۳. نتایج آزمون کشش برای نمونه های جوشکاری شده

| شماره نمونه | سرعت چرخش (rpm) | سرعت پیشروی (mm/min) | استحکام تسلیم (MPa) | استحکام نهایی (MPa) | ازدیاد طول٪ |
|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۷۰۰ | ۶۰ | ۴۴۰ | ۵۸۰ | ۲۶ |
| ۲ | ۱۰۰۰ | ۴۰ | ۳۹۰ | ۵۴۵ | ۱۷ |
| ۳ | ۱۰۰۰ | ۶۰ | ۴۳۲ | ۵۶۶ | ۱۸ |
| ۴ | فلز پایه | – | ۳۸۰ | ۵۴۰ | ۲۹ |



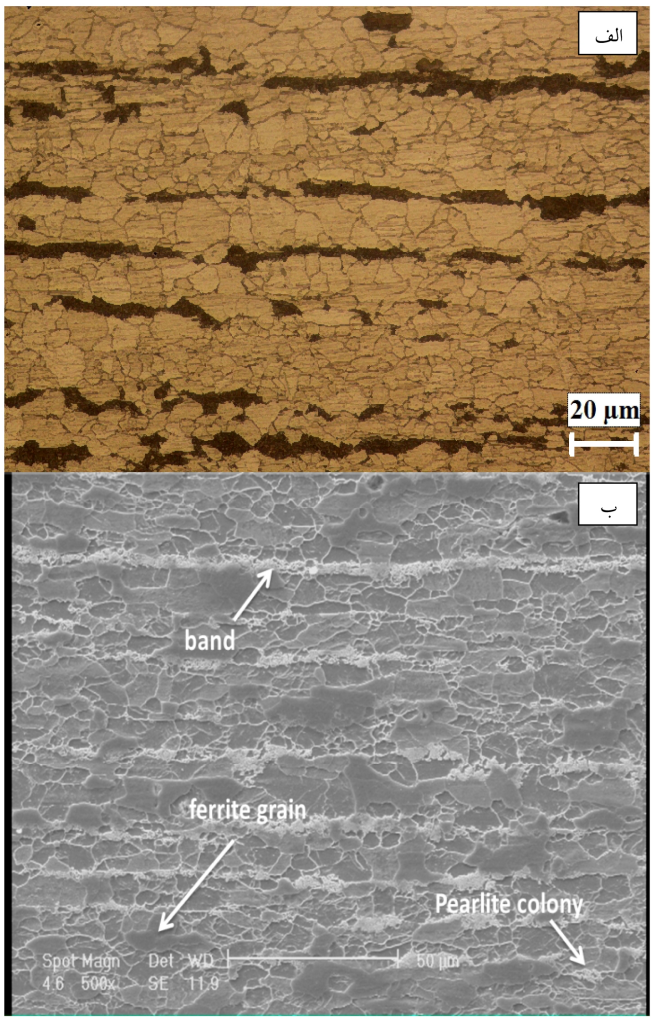

شکل ۱. شماتیک فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی.

است. در واقع کسر فازهای ایجاد شده پس از جوشکاری تابع بیشترین گرمای ایجاد شده در آن منطقه و سرعت سرد شدن بعد از جوشکاری است[۱و۲].

ریزساختار منطقه جوش اصطکاکی اغتشاشی فولاد X-60 نشان دهنده تشکیل فاز آستنیت در حین جوشکاری و استحاله آن به فازهای متفاوت است. فازهایی که در فولادهای فریتی کم کربن و کم آلیاژ استحکام بالا تشکیل می‌شود وابستگی شدیدی به نرخ سرد شدن دارند. اثرگذاری پارامتر نرخ سرد شدن و ریزساختار از دیاگرام‌های استحاله فازی سرد شدن مداوم(CCT) بدست می‌آید که وابستگی شدیدی به ترکیب شیمیایی و اندازه دانه آستنیت دارد به طوریکه با افزایش اندازه دانه آستنیت امکان تشکیل فریت و پرلیت به خاطر کاهش مناطق جوانه زنی و انرژی داخلی آستنیت، کاهش می یابد. کم شدن دمای بیشینه و گرمای ورودی در حین جوشکاری منجر به ریز شدن دانه‌های آستنیت قبلی و تقویت ایجاد فریت مرزدانه‌ای و فریت هم محور می شود. علاوه بر آن به خاطر تغییر فرم شدید حین جوشکاری دمای تشکیل بینیت کاهش یافته و امکان تشکیل فریت افزایش می یابد[۱۰و۱۱].

براساس شکل۳ مشخص است که پس از جوشکاری به علت بالا رفتن دمای فلز پایه تا محدوده پایداری آستنیتی و سریع سرد شدن، ساختار آستنیتی به طور کامل به فریت هم محور و فریت سوزنی تبدیل شده است. علت وجود ریز ساختار ریز تیغه‌ای می‌تواند براثر سریع سرد شدن در حین جوشکاری و کرنش و تغییر شکل پلاستیکی در ناحیه اغتشاش

[ Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-02 ]




شکل ۲. ریز ساختار فولاد API-X-60 استفاده شده در این تحقیق الف)تصویر نوری ب) تصویر SEM

یافته باشد[۴و۱۰].

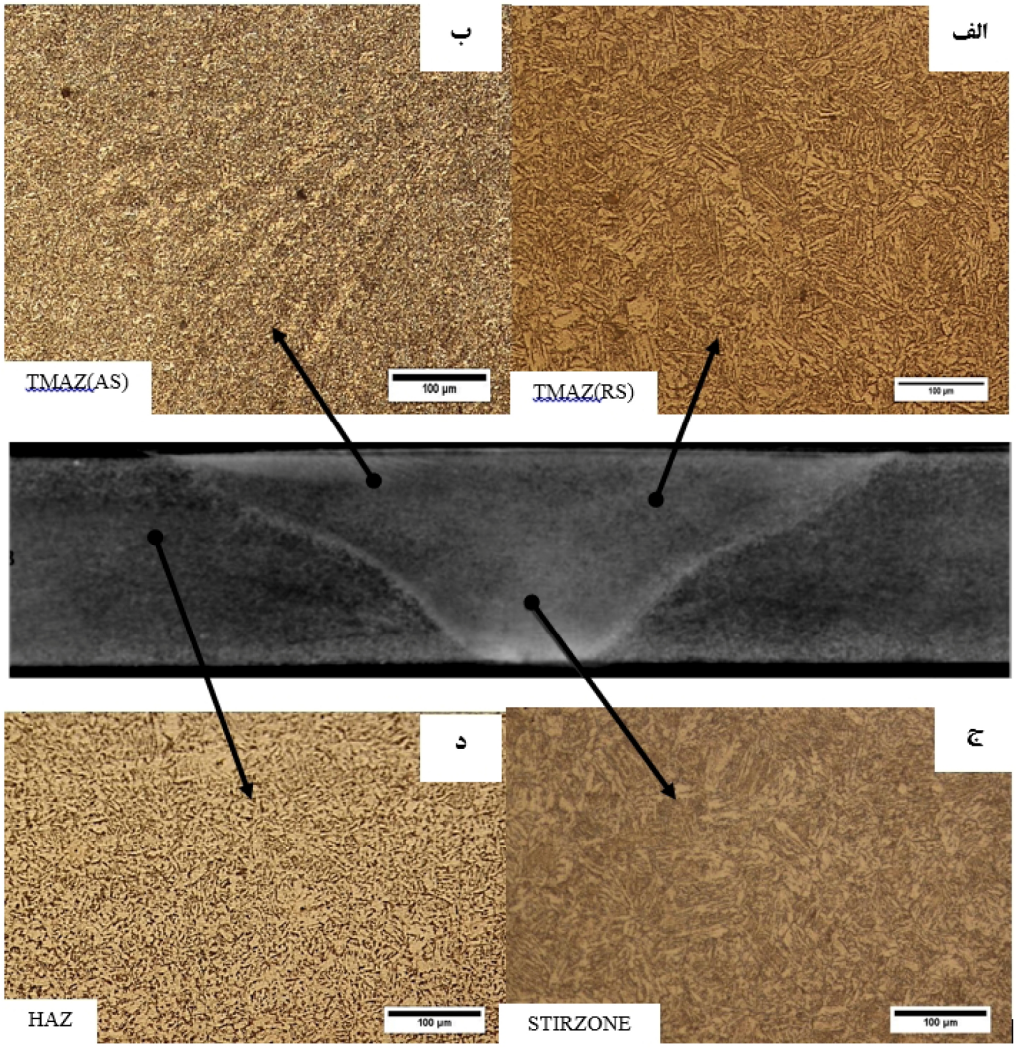
ریزساختار ناشی از جوشکاری به دو فاکتور دمای بیشینه و نرخ سرد شدن وابسته است که با تغییر پارامترهای جوشکاری و پیرو آن گرمای ورودی تغییر می‌کند[۹]. افزایش گرمای ورودی منجر به افزایش دمای بیشینه، کاهش نرخ سرد شدن و توزیع یکنواخت گرما در کل نمونه می‌شود. فاکتور دیگری که تاثیر بسزایی بر ریزساختار دارد گرمای ایجاد شده ناشی از اصطکاک شانه با فلز پایه و گرم کردن سطح نمونه شده و در مقابل به خاطر نزدیک بودن آن به محیط و انتقال حرارت سریع‌تر، سرعت سرد شدن بیشتری دارد[۱۰].

در رابطه با ریزساختار ایجاد شده در منطقه تحت تاثیر حرارتی- مکانیکی در همه نمونه‌ها دارای فریت های ریزدانه همراه با کلونی‌های سمنتیت بوده که ریز بودن دانه‌های فریت در آن نسبت به فریت فلز پایه به خاطر تنش و کرنش اعمالی ناشی از جوشکاری و تبلور مجدد دینامیکی فریت دانست. در مقابل منطقه تحت تاثیر حرارتی به خاطر تجربه سیکل حرارتی تقریبا ریزساختار شبیه فلز پایه دارد اما مقداری از پرلیت در آن متلاشی شده و منجر به پخش شدن سمنتیت در زمینه فریت شده است [۱۱].

در رابطه با اثرگذاری پارامترهای جوشکاری بر ریزساختار منطقه اغتشاش، علاوه بر سیکل گرمایی، سیکل مکانیکی و توزیع کرنش و تنش نیز حائز اهمیت می‌شود. زمانی که دانه های آستنیت تغییر فرم شدیدی در حین سرد شدن تحمل می‌کنند، علاوه بر تبلور مجدد دینامیکی آستنیت، دمای شروع تشکیل استحاله بینیت از آستنیت کاهش یافته در حالیکه ایجاد فریت به خاطر افزایش مکان‌های جوانه زنی افزایش می‌یابد [۵و۱۰]. همچنین گزارش شده که دمای شروع تشکیل بینیت وابستگی شدیدی به دمای بیشینه، نرخ سرد شدن و نرخ کرنش و تنش در حین جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی دارد. به طوری که کاهش گرمای ورودی و اندازه دانه آستنیت قبلی منجر به کاهش مقادیر بینیت می شود؛ اما در مقابل موجب ریز شدن وکاهش فاصله بین تیغه‌های بینیتی و افزایش فریت هم محور می‌شود. علاوه بر آن گزارش شده در نمونه‌هایی که تنش و کرنش بیشتری تحمل کرده‌اند، تغییر فرم پلاستیک شدید و به تعویق افتادن استحاله‌های فازی منجر به زیاد شدن فریت هم محور شده است [۱۱و۱۲].

مطابق با شکل ۴ (الف، ج) در رابطه با تاثیر گذاری سرعت چرخشی بر ریزساختار باید اشاره کرد که در منطقه اغتشاش، زمانیکه سرعت چرخشی زیاد باشد، دانه های آستنیت تغییر فرم شدیدی در حین سرد شدن تحمل می‌کند که منجر به کاهش دمای شروع استحاله بینیت از آستنیت شده در حالیکه ایجاد فریت به خاطر افزایش مکان‌های جوانه‌زنی آن افزایش می‌یابد. در مقابل گزارش شده افزایش گرمای ورودی منجر به بزرگ شدن اندازه آستنیت قبلی و ترغیب ایجاد فازهای ناشی از

[ Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-02 ]



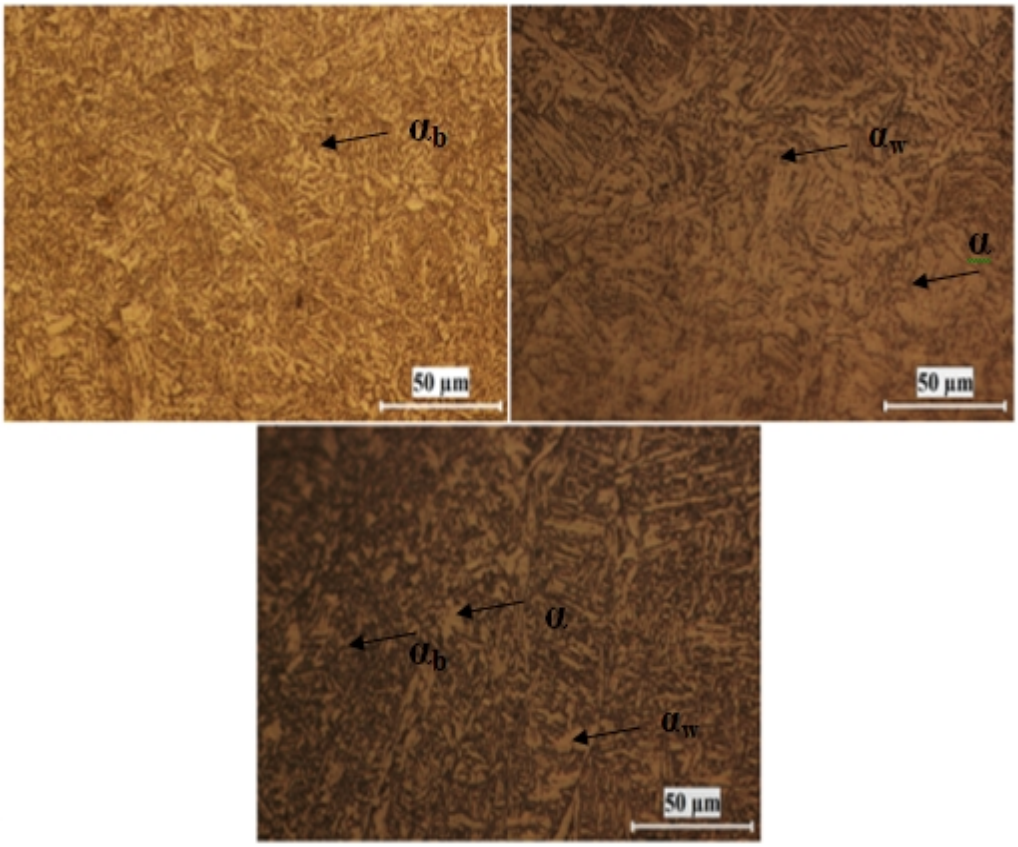

شکل ۳.ریزساختار مناطق ایجاد شده ناشی از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی فولاد X-60 (FSW1000-60)

الف)ناحیه پسرونده ب)ناحیه پیشرونده ج)منطقه اغتشاش د)منطقه متاثر از حرارت

استحاله برشی می‌گردد. علاوه بر آن زیاد بودن سرعت چرخشی منجر به نرم شدن ماده و آزاد شدن کرنش باقی مانده در ماده می‌گردد. در نمونه با سرعت چرخشی کمتر به خاطر زیاد بودن تنش و کرنش باقیمانده در ماده، مقادیر فریت بیشتر شده و فاصله‌ی بین تیغه‌های بینیت کاهش می‌یابد. همچنین سرعت چرخشی بالاتر منجر به افزایش گرمای ورودی، کاهش تنش سیلان ماده، بزرگتر شدن اندازه دانه‌های آستنیت قبلی، نرم شدن ماده و کاهش مقادیر کرنش و تنش موجود در ماده شده که منجر به ایجاد فریت ویدمن و بینیت می‌شود. در مقابل نمونه با سرعت چرخشی کمتر، به خاطر زیاد بودن کرنش و تنش در ماده، ایجاد آستنیت ریز دانه تر و زیاد بودن دانسیته نابه‌جایی ها، مقادیر فریت بیشتری ایجاد می شود.

همچنین در رابطه با تاثیرگذاری سرعت پیشروی بر ریزساختار بر اساس شکل ۴(الف، ب) باید اشاره کرد که تغییر در سرعت پیشروی منجر به تغییر در دمای بیشینه و نرخ سرد شدن شده که این دو عامل در کنار نرخ کرنش اعمالی در هین جوشکاری باعث تغییر در نوع فازها و توزیع آنها در منطقه جوش می‌گردد.گزارش شده زمانیکه سرعت پیشروی کم باشد منجر به کاهش نرخ سرد شدن و تنش سیلان موجود در قطعه شده که باعث ایجاد فریت چندوجهی می‌گردد اما با افزایش سرعت

[ Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-02 ]



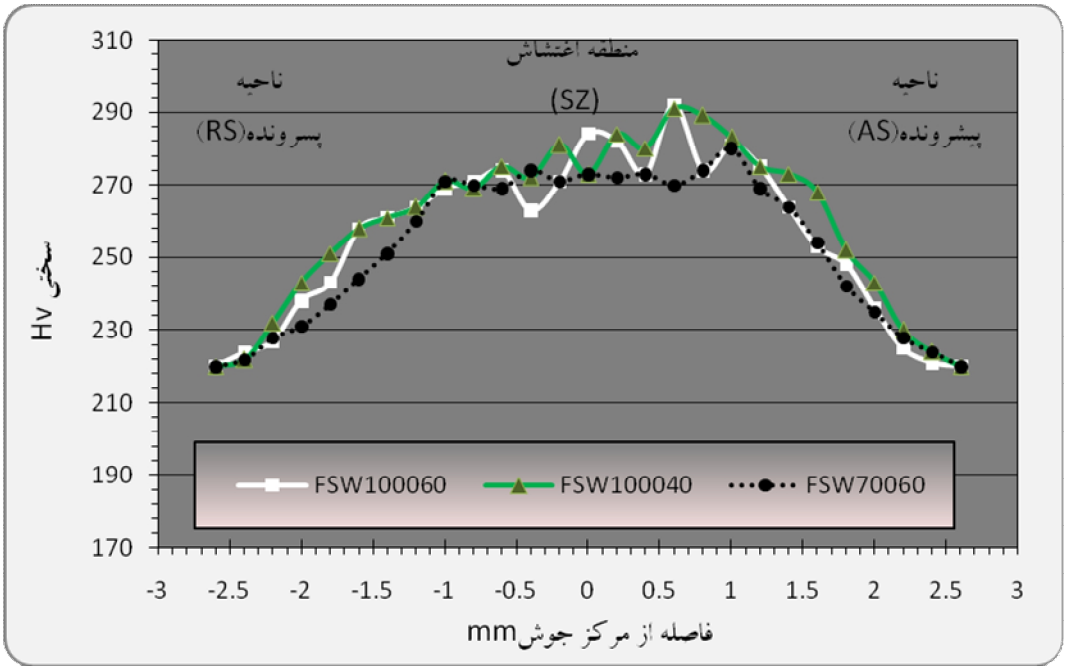

شکل۴.منطقه اغتشاش یافته ناشی از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی فولاد X-60 الف)FSW1000-60 ب)-FSW1000
40 ج) FSW700-60 (بینیت= αb، فریت= α،فریت ویدمن= αw)

پیشروی و اعمال سیکل مکانیکی شدید به ماده منجر به تغییر فرم شدید دانه‌های و تقویت نیروی محرکه لازم جهت ایجاد فریت سوزنی و بینیت ریز در ریزساختار منطقه جوش می شود. همچنین بزرگ شدن دانه ها در اثر گرمای ورودی بیشتر منجر به ترغیب تشکیل فریت ویدمن و بینیت در ریزساختار می‌شود.از طرف دیگر گزارش شده تفاوت اصلی ریزساختار با تغییر سرعت پیشروی در اندازه فاز فریت و بسته‌های بینیتی است که علت آن را می‌توان به افزایش تغییر فرم دانه‌ها که منجربه افزایش محل جوانه زنی فریت چندوجهی و ایجاد آن در ریزساختار می‌گردد [۱۱].

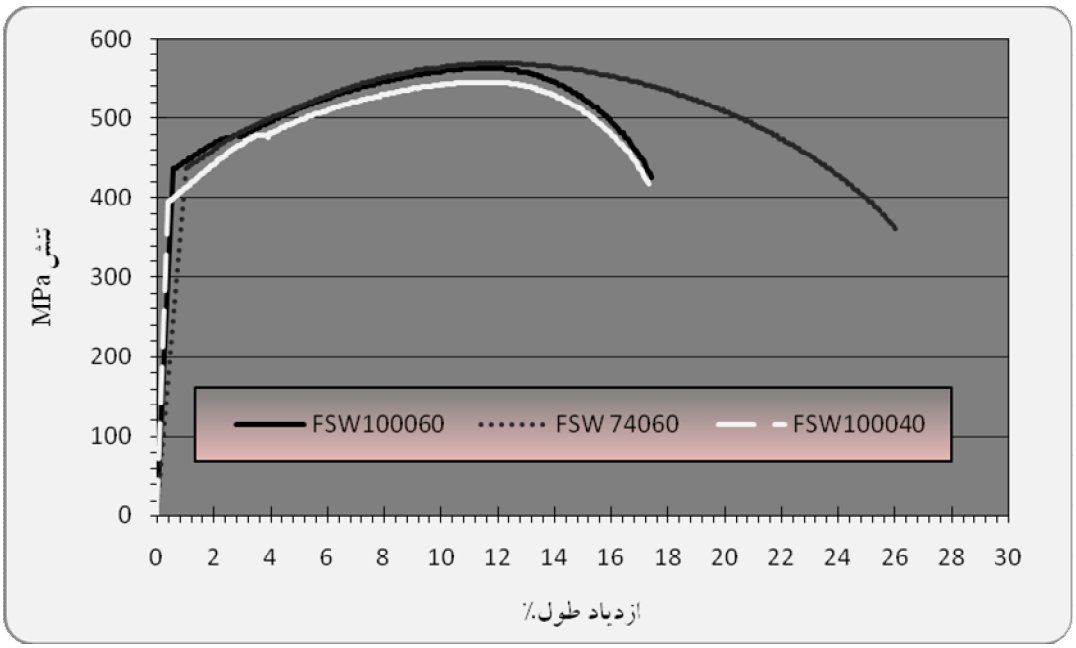
### ۳-۲- بررسی ریزسختی

ریزسختی مقطع جوش در فاصله ۱ میلی‌متر نسبت به سطح جوشکاری شده در شکل ۵ آمده است. رفتار متفاوت سختی، در واقع به علت رقابت بین اثرگذاری دمای بیشینه و سرعت سرد شدن است که منجر به ایجاد ریز ساختارهای مختلف در مناطق متفاوت ایجاد شده حاصل از جوش می شود. در تمام نمونه‌ها بیشترین میزان سختی در منطقه اغتشاش سمت پیشرو و کمترین سختی در HAZ و فلز پایه ایجاد شده است. همچنین زیاد بودن گرمای ورودی(نمونه FSW 1000-40)موجب بزرگتر شدن پهنای مناطق ایجاد شده ناشی از جوشکاری شده است بطوری‌که با افزایش سرعت پیشروی، میزان گرمای ورودی کاهش یافته که ناحیه با سختی کم به ناحیه مرکزی جوش نزدیکتر شده که این موجب ایجاد شیب سختی زیاد در نمونه و نزدیک‌تر شدن خط جوش به HAZ شده است[۱۰و۱۱]. تغییر در میزان سختی ناحیه اغتشاش در اثر تغییر در پارامترهای جوشکاری در حدود ۳۰-۴۰ ویکرز مشاهده شده که علت آنرا می‌توان به تغییر در نوع ریزساختار

[ Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-02 ]




شکل ۵. پروفیل سختی نمونه‌های اصطکاکی اغتشاشی شده فولاد X-60.




شکل ۶. نمودار تنش-کرنش مهندسی نمونه‌های اصطکاکی اغتشاشی شده فولاد X-60.

ایجاد شده در ناحیه جوش که در قسمت قبل به آن اشاره شد، مرتبط دانست [۱۰]. پیرامون بیشترین میزان سختی در منطقه جوش و در قسمت پیشرونده گزارش شده که مکانیزم ایجاد منطقه‌ی سخت در قسمت پیشرو فولاد HSLA-65 به علت تفاوت در سرعت سرد شدن و وجود دمای بیشینه بالاتر در قسمت پیشرونده نسبت به پسرونده منجر به ایجاد ریزساختار متفاوت شده است. سرعت سرد شدن حدود ۳ برابر از دمای بیشینه در ایجاد ریزساختار تاثیرگذارتر است و در ناحیه پیشرونده حداقل $150^{o}C/Sec$ بیشتر از قسمت پسرونده است [۱۳].

[ Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-02 ]

### ۳-۳- رفتار مکانیکی جوش

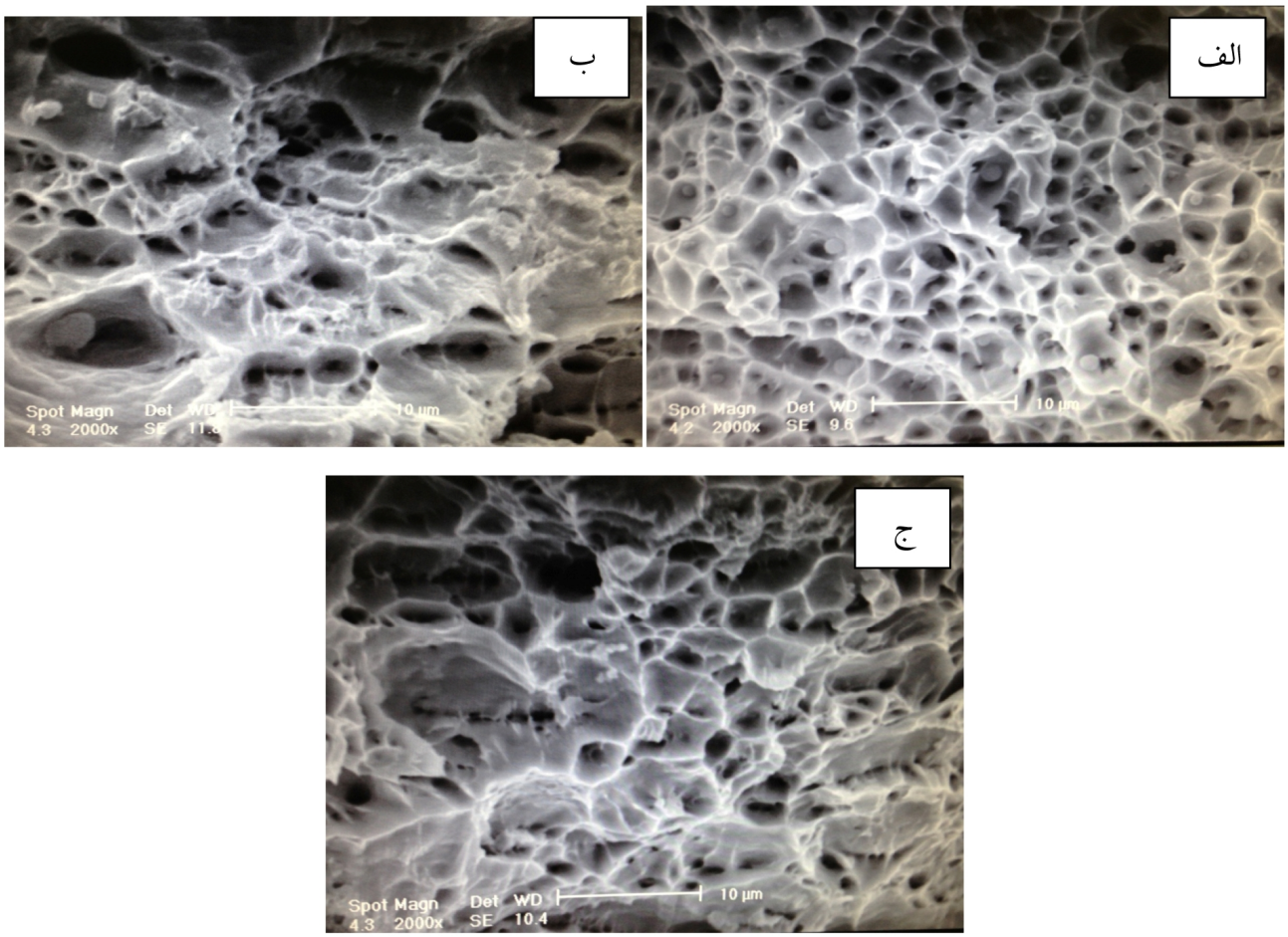
منحنی آزمون کشش مقطع عرضی نمونه‌های جوشکاری شده در شکل ۶ آمده است. پس از آزمون کشش، همه‌ی نمونه‌ها در قسمت نزدیک به HAZ و در طرف پیشران جوش شکسته شدند [۱و۴]. پارامترهای مختلف جوشکاری FSW از جمله سرعت پیشروی موجب تغییر در نرخ کرنش، اندازه دانه و دمای بیشینه می‌شود. این سه فاکتور کنترل کننده اصلی در تبلور مجدد دینامیکی دانه‌های آستنیتی هستند. همانطور که در قسمت قبل بحث شد، اندازه دانه و استحاله فازی انجام شده در جوشکاری حالت جامدِ فولادهای با استحکام بالا، توسط تغییر شکل پلاستیکی شدید در محدوده دمای آستنیتی کنترل می‌شود. دمای تغییر فرم در حین جوشکاری FSW فولاد بالاتر از ۱۰۰۰°C می‌رود که نشان‌دهنده آن است که تبلور مجدد دینامیکی مکانیزم اصلی در ریز دانه کردن منطقه جوش است.

گرمای زیاد منجر به پیشرفت تبلور مجدد دینامیکی و رشد دانه‌های آستنیتی می‌شود [۸و۱۴].

در بررسی ارتباط بین گرمای ورودی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی فولاد X-60 با خواص مکانیکی، مطابق با جدول ۳ مشخص شد که با افزایش گرمای ورودی استحکام تسلیم و استحکام نهایی جوش کاهش پیدا کرده است (نمونه FSW 1000-40نسبت به FSW 700-60) اما در تمام شرایط استحکامی بیشتر از فلز پایه دارد که علت آن را می توان ریز بودن ساختار منطقه جوش، ایجاد فازهای بینیت و فریت سوزنی در منطقه جوش و چگالی بالا نابجایی‌ها در این منطقه دانست[۱۴].

### ۳-۴- شکست نگاری

برای انجام آزمون شکست نگاری نمونه های کشیده شده،




شکل۷. سطح شکست نمونه‌های جوشکاری بعد ار آزمون کشش الف)فلز پایه ب)FSW1000-40 ج) FSW700-60

[ Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-02 ]

تصویر گیری بر روی سطح مقطعی که در اثر تست کشش شکسته شده بود انجام شد. شکل ۷ این تصاویر را با بزرگنمایی ۲۰۰۰ برابر نشان می دهد. در تصاویر شکست نگاری دیمپل ها نشان دهنده شکست نرم و صفحات رخ برگی نشان دهنده شکست ترد می‌باشد مطابق با آنچه در تصاویر دیده می‌شود شکست به خاطر تغییر فرم پلاستیکی قبل از شکست به صورت نرم رخ داده است. گزارش شده اندازه دیمپل‌های موجود در سطح شکست رابطه خطی با استحکام و انعطاف‌پذیری دارد به طوریکه کاهش اندازه‌ی دیمپل‌ها منجر به افزایش استحکام و انعطاف پذیری می‌گردد. وجود دیمپل‌های ریز و نحوه قرارگیری آنها در سطح شکست نمونه جوشکاری حالت جامد نشان‌دهنده‌ی زیاد بودن استحکام این جوش نسبت به جوشکاری فلز پایه است.

همچنین با توجه به ریزساختار ریز و هم محور منطقه جوش که شامل فریت سوزنی و بینیت است، انتظار می‌رود که شکست به صورت نرم خارج از منطقه جوش صورت بگیرد. با مقایسه فلز پایه و نمونه های جوشکاری شده مشاهده شد در اثر جوشکاری دیمپل ها بزرگتر، تعداشان کمتر و توزیعشان غیر یکنواخت تر شده است که دلایل آن عبارتند از:

- به علت ریزساختار هموژن و یکنواخت تر فلز پایه نسبت به فلز جوش
- ممکن است بدلیل وجود تنش های باقیمانده در اثر جوشکاری باشد.

با مقایسه تصاویر (ب) و (ج) مشاهده شد تغییر در پارامترهای جوشکاری تاثیر زیادی بر نوع شکست و اندازه دیمپل‌ها ندارد.

## ۴- نتیجه گیری

- جوش سالم و بدون عیب در اثر جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی فولاد X-60 بدست آمد.
- ریزساختار منطقه جوش دارای فازهای فریت سوزنی،فریت هم محور و بینیت است.
- تغییر پارامترهای جوشکاری منجر به تغییر در توزیع فازهای موجود در منطقه اغتشاش و تغییر سختی در راستای مقطع جوش شده است.
- افزایش سرعت چرخشی منجر به افزایش گرمای ورودی،کاهش سختی در منطقه جوش و توزیع یکنواخت سختی شده است.
- ریزساختار ریز و هم محور منطقه اغتشاش منجر به افزایش استحکام نهایی و استحکام تسلیم نسبت به فلز پایه شده است.

## منابع


1-Sampath, K. , "An Understanding of HSLA-65 Plate Steels", *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 15, No. 1, pp. 32-40, 2006.

2-Buahombura, P. , "High Strength Low Alloy Steel", M.T., Suranaree University of Technology, 2008.

3-Konkol, P.J., Warren, J., Hebert, P. , "Weldability of HSLA-65 Steel For Ship Structures", *Welding Journal*, Vol. 77, No., pp. 361-s, 1998.

4- Konkol, P.J., and Mruczek, M.F., "Comparison of Friction Stir Weldments and Submerged Arc Weldments in HSLA-65 Steel", *Welding Journal*, Vol. 86, No. 7, pp. 187, 2007.

5- Mishra, R. S., and Mahoney, M.W., "Friction stir welding and processing", *ASM International*. 2007.

۶- اهل سرمدی،م. "جوشکاری فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی UNS S32750 با روش‌های اصطکاکی اغتشاشی و قوسی الکترود تنگستن گاز و ارزیابی خواص مکانیکی و ریزساختاری"، پایان نامه کارشناسی ارشد،دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۹۴.

7.-Lienert, T., Stellwag Jr, W., Grimmett, B., Warke, R., "Friction Stir Welding Studies on Mild Steel", *Welding Journal*, Vol. 82, No. 1, pp. 1-9, 2003.

8-Pradeep, A., "A Review of Friction Stir Welding of Steels", *International Journal of Engineering Research and Development* ,Vol.3, Issue 11, pp. 75-79, September 2012.

9-Ozekcin, A., Jin, H., Koo, J., Bangaru, N., Ayer, R., Vaughn, G., Steel, R., and Packer, S., "A Microstructural Study of Friction Stir Welded Joints of Carbon Steels", *International Journal of*


[ Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-02 ]

*Offshore and Polar Engineering*, Vol. 14, No. 4, pp. 284-288, 2004.

10-Wei, L., and Nelson,T., "Correlation of Microstructures and Process Variables in FSW HSLA-65 Steel", *Welding Journal*, Vol. 90, No. 1-3, pp. 95s-101s, 2011.

11-Failla, D.M., "Friction Stir Welding and Microstructure Simulation of HSLA-65 and Austenitic Stainless Steels", M.T., Ohio State University, 2009.

12- Lippold, J. C., "Welding Metallurgy and Weldability", New Jersey, *John Wiley &Sons*, 2015.

13-Allred, J.D., "An Investigation into the Mechanisms of Formation of the Hard Zone in FSW X65", Master Thesis., Brigham Young University, 2013.

14-Nelson, T. W., Wei, L., and Abbasi, M., "Effect of Heat Input on Post-Weld Microstructure and Mechanical Properties in FSW X-65," *Proc. The Twenty-first International Offshore and Polar Engineering Conference, International Society of Offshore and Polar Engineers*, 2011.

واژه‌نامه

[1] High Strength Low Alloy

کم آلیاژ استحکام بالا

[2] Thermo-mechanical Controlled Processing

فرایند کنترل شده به روش ترمو مکانیکی

[3] Heat Affected Zone

منطقه متاثر از حرارت

[4] Friction Stir Welding

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

[5] The Welding Institute

انجمن جوشکاری

[6] Continuous Cooling Temperature Diagrams

نمودار سرد شدن پیوسته

[7] Scanning Electron Microscopy

میکروسکوپ الکترون روبشی

[ Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-02 ]