

## Research Paper

# Investigation of hardness Hall-Petch relationship in the stir zone of friction stir welds between austenitic stainless steel and plain carbon steel

Mostafa Jafarzadegan

Assistant Professor, Materials Science Department, Faculty of Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

**Citation:** Jafarzadegan M. Investigation of hardness Hall-Petch relationship in the stir zone of friction stir welds between austenitic stainless steel and plain carbon steel. Metallurgical Engineering 2018; 21(1): 46-53 <http://dx.doi.org/10.22076/me.2018.73226.1155>

**doi:** <http://dx.doi.org/10.22076/me.2018.73226.1155>

## ABSTRACT

Friction stir welding is a new and effective method for joining the alloys with welding problems and also for the dissimilar alloys. In the present study, friction stir welding is used to join st37 low carbon to AISI 304 stainless steel plates at different tool rotation speeds. The stir zone in AISI 304 stainless steel shows evidence of dynamic recrystallization with a moderate dislocation density. The stir zone in st37 steel appears to experience dynamic recrystallization too, although the allotropic transformation during cooling cycle of the welds removes the features of dynamic recrystallization and produces a fine ferrite-pearlite microstructure with a low dislocation density. The relationship between hardness and microstructure is investigated through the Hall-Petch equation for the stir zone of both steels. The results of weighted least-squares fit also show that the average hardness of austenite in AISI 304 steel and ferrite in st37 steel inside the stir zones has a reverse relation with hardness according to the Hall-Petch equation. The hardness of the base metal and the stir zones of AISI 304 stainless steel does not stand on a same Hall-Petch line that can be attributed to the relatively higher dislocations due to the dynamic recrystallization of stir zones.

**Keywords:** Dissimilar Friction Stir Welding, Microstructure, Hardness, Hall-Petch Relationship.

■ ..... ■

\* **Corresponding Author:**

**Mostafa Jafarzadegan, PhD**

**Address:** Materials Science Department, Faculty of Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

**Tel:** +98 (28) 33901186

**E-mail:** jafarzadegan@eng.ikiu.ac.ir

## بررسی رابطه سختی هال - پیچ در ناحیه همزده جوش های همزن اصطکاکی فولاد کربنی و فولاد زنگ نزن آستنیتی

مصطفی جعفرزادگان

استادیار گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

### چکیده

جوشکاری همزن اصطکاکی، روشی نوین و مؤثر برای جوشکاری بسیاری آلیاژهای دارای مشکل جوشکاری و همچنین برای اتصال آلیاژهای غیر همجنس می باشد. در تحقیق حاضر، جوشکاری همزن اصطکاکی برای اتصال غیرهمجنس لب به لب فولاد کم کربن st37 به فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴ در سرعت های چرخشی مختلف استفاده شده است. نتایج بررسی های آزمایشگاهی نشان داد که ناحیه همزده در فولاد ۳۰۴ شواهد وقوع بازبلوری پویا را به همراه چگالی متوسطی از نابجایی ها در خود دارد. ناحیه همزده در فولاد st37 اگرچه در معرض بازبلوری قرار گرفته ولی وقوع استحاله الوتروپی در حین سرد شدن فولاد پس از جوشکاری، شواهد وقوع بازبلوری را از بین می برد و ریزساختاری حاوی عمدتاً فریت و پرلیت ریز باقی می گذارد. رابطه سختی و ریزساختار از طریق رابطه هال - پیچ برای نواحی همزده در هر دو فولاد بررسی گردید. نتایج برآزش به روش حداقل مربعات وزنی نشان داد که سختی متوسط نواحی همزده هر دو فولاد طبق رابطه هال - پیچ با اندازه دانه، رابطه معکوس دارد. سختی نواحی همزده و فلز پایه فولاد ۳۰۴ روی یک خط هال - پیچ قرار نمی گیرد که این موضوع را می توان به وجود نابجایی های نسبتاً بیشتر ناشی از بازبلوری پویا در نواحی همزده مربوط دانست.

**واژه های کلیدی:** جوشکاری غیرهمجنس همزن اصطکاکی، ریزساختار، سختی، رابطه هال - پیچ

### ۱. مقدمه

ناحیه همزده و در نتیجه باعث افزایش سختی می گردد البته به جز در مواردی که ماده اولیه کارسرد شده یا مارتنزیتی باشد یا FSW باعث حل شدن یا رشد رسوبات استحکام بخش در ناحیه همزده شود. اگرچه فرایند بازبلوری پویا در FSW نسبتاً متفاوت از بازبلوری ایستا می باشد، باین حال طبق بررسی های برخی محققان، دانه های به وجود آمده و سختی ناشی از ریزدانگی در آلیاژهای آلومینیوم [۶، ۷]، منیزیم [۸] AZ91D، مس خالص [۹] و فولاد ODS [۱۰] از رابطه هال - پیچ طبیعت می کنند.

در این پژوهش، جوشکاری همزن اصطکاکی در سرعت های چرخش (rpm) مختلف برای ایجاد اتصال سالم بین فولاد کم کربن st37 و فولاد زنگ نزن ۳۰۴ انجام شده است. این نوع از اتصال غیرهمجنس به طور وسیعی در صنایع نیروگاهی برای کاهش هزینه مواد و افزایش بازده در کاربردهای دمای بالا استفاده می شود [۱۱، ۱۲]. در ادامه، ارتباط ریزساختار و سختی از طریق رابطه هال - پیچ برای نواحی همزده جوش ها در هر دو فولاد مورد بررسی قرار گرفته است.

جوشکاری همزن اصطکاکی (FSW)، ابداع شده توسط موسسه جوشکاری (TWI)<sup>۱</sup>، روش جوشکاری حالت جامدی است که منجر به تولید جوش هایی با کیفیت بالا و خواص مکانیکی بهتر از روش های جوشکاری ذوبی می گردد [۱، ۲]. جوشکاری همزن اصطکاکی، برتری در خواص مکانیکی اش را مدیون رخدادهای بازبلوری پویا (DRX)<sup>۳</sup> در ناحیه همزده (SZ)<sup>۴</sup> می باشد که ناشی از حرارت اصطکاک و تغییر شکل مومسان شدید است. سازوکارهای متفاوتی برای وقوع DRX پیشنهاد شده است مانند بازبلوری پویای پیوسته (CDRX)<sup>۵</sup>، بازبلوری پویای ناپیوسته (DDRX)<sup>۶</sup> و بازبلوری پویای هندسی (GDRX)<sup>۷</sup> [۳-۵].

1. Friction Stir Welding
2. The Welding Institute
3. Dynamic Recrystallization
4. Stir Zone
5. Continuous dynamic Recrystallization
6. Discontinuous Dynamic Recrystallization
7. Geometric Dynamic Recrystallization

\* نویسنده مسئول:

دکتر مصطفی جعفرزادگان

نشانی: قزوین، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مواد.

تلفن: ۰۱۱۸۶ ۳۳۹۰ (۲۸) ۰۹۸+

پست الکترونیکی: jafarzadegan@eng.ikiu.ac.ir

جدول ۱. ترکیب شیمیایی فولاد زنگ نزن ۳۰۴ و فولاد کم کربن st37.

Material	C	Si	Mn	Cr	Ni	Fe
steel st37	0.11	0.03	0.56	0.07	0.03	Balance
steel 304	0.034	0.55	1.33	18.50	8.44	Balance

## ۲. مواد و روش تحقیق

در پژوهش حاضر، ورق‌های ۳ mm فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴ به صورت لب‌لب به ورق‌های فولاد کم کربن st37 اتصال داده شدند. ترکیب شیمیایی ورق‌ها در جدول ۱ نمایش داده شده است. فولاد st37 در سمت پیشرونده جوش (AS) و فولاد 304 در سمت پسرونده (RS) قرار گرفتند تا از ایجاد حفرات و عیوب تونلی در سمت AS جلوگیری شود. در جوشکاری FSW غیرهمجنس ماده دارای استحکام کمتر بهتر است در سمت AS قرار گیرد [۱].

جوشکاری FSW به وسیله یک دستگاه فرز با سرعت‌های چرخش ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ rpm انجام شد. سرعت جوشکاری ۵۰ mm/min ثابت در نظر گرفته شد. ابزار FSW از جنس کاربید تنگستن - کبالت (WC-Co) با قطر شانه ۱۶ mm، قطر پین ۵.۵ mm و ارتفاع پین ۲.۸ mm بود. ابزار ۳ درجه نسبت به محور عمود بر ورق‌ها زاویه داشت و توسط آبگرد خنک می‌شد. برای جلوگیری از اکسید شدن ورق و ابزار از جریان گاز آرگون با نرخ ۲۰ lit/min حول ابزار استفاده شد. دما در سطح جوش‌ها به وسیله دستگاه ترمومتر فروسرخ غیرتماسی اندازه‌گیری شد.

نمونه‌های متالوگرافی برای بررسی توسط میکروسکوپ نوری و TEM با روش‌های استاندارد تهیه و سپس اچ شدند. فولاد st37 برای بررسی با میکروسکوپ نوری با محلول نایتال ۲٪ و  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  ۱۰٪ اچ شدند. برای اچ کردن فولاد 304 نیز از اچ الکترولیتی با محلول اسید نیتریک ۶۰٪، ولتاژ ۵ v و زمان ۱۰ s استفاده شد. اندازه‌گیری شد. نمونه‌های TEM پس از برش و نازک‌سازی، توسط روش فوران دوطرفه الکترولیتی محلول اتانول ۹۰٪ +  $\text{HClO}_4$  ۱۰٪ در ولتاژ ۴۵ v آماده شدند. ریزسختی‌سنجی ویکرز بر روی مقطع عرضی جوش‌ها بر روی خطی در وسط مقطع با بار ۰/۹۸ N و زمان ۱۵ s انجام شد.

## ۳. نتایج و بحث

تصاویر میکروسکوپ نوری و TEM از ریزساختار فولادهای پایه 304 و st37 در شکل ۱ نشان داده شده است. فولاد ۳۰۴ حاوی دانه‌های هم محور آستنیت با اندازه متوسط  $18 \mu\text{m}$  و فولاد st37 متشکل از پرلیت و فریت با اندازه دانه متوسط

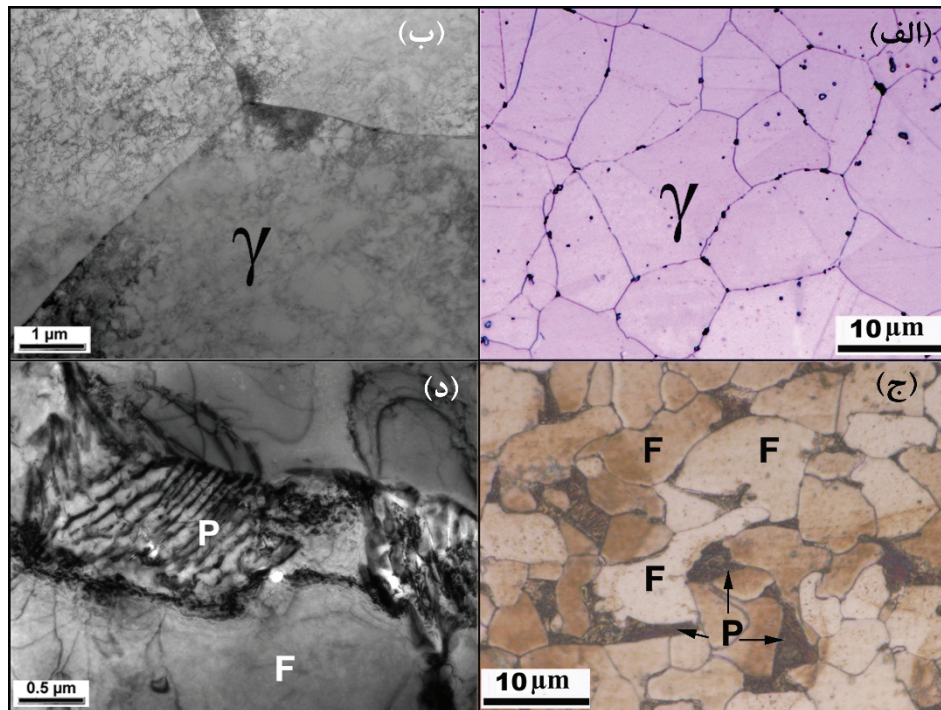
9. Advancing Side
10. Retreating Side
11. Mean Linear Intercept

$15 \mu\text{m}$  می‌باشد. تصاویر TEM نشان می‌دهد که دانه‌های آستنیت در فولاد 304 و فریت در فولاد st37 دارای چگالی نابجایی کمی هستند که این امر به دلیل آن است که هر دو فلز پایه در حالت آنیل شده بوده‌اند.

جوشکاری FSW در شرایط ذکر شده جوش‌های بدون عیبی ایجاد نمود. ناحیه همزده در جوش‌های غیرهمجنس از دو قسمت دانه‌های ریز آستنیت در سمت پسرونده و ساختار عمدتاً فریتی - پرلیتی ریز در سمت پیشرونده تشکیل شده است. اندازه‌گیری دما، حداکثر دما بر روی سطح جوش‌ها را برای جوش‌های ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ rpm به ترتیب در حدود ۱۰۰۰، ۱۱۰۰ و  $1150^\circ\text{C}$  نشان داد. مقطعی از دیاگرام‌سازی سیستم Fe-Cr-Ni در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، آلیاژی با حدود ۱۸%Cr در دماهای ذکر شده، در ناحیه آستنیتی قرار دارد و در اثر سرد شدن سریع پس از جوشکاری نیز هیچ تبدیل فازی در ماده نخواهد داشت (لازم به ذکر است که تشکیل فاز  $\sigma$  نیاز به دماهای بالا و زمان‌های بسیار طولانی دارد که در FSW اتفاق نمی‌افتد) [۱۲]. بنابراین، شواهد مربوط به وقوع بازبلوری پویا در ماده، دست‌نخورده باقی می‌مانند. فولاد 304 دارای انرژی نقص در چیده شدن (SFE)  $12$  کمی در حدود  $21 \frac{\text{mJ}}{\text{m}^2}$  می‌باشد [۴]. وقوع بازبلوری پویا در FSW فولاد زنگ نزن قابل تشخیص است [۱۳] و با توجه به کرنش‌های زیاد و دمای بالا در حین FSW، بازبلوری پویا از نوع غیرپیوسته همراه با جوانه‌زنی و حرکت مرزهای بزرگ زاویه انتظار می‌رود.

شکل ۳ تصاویر نوری و TEM از ناحیه همزده جوش‌ها در سمت فولاد ۳۰۴ را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود ریزساختار نسبتاً غیر همگن و شامل دانه‌های بزرگ و کوچک آستنیت می‌باشد. مشخص شده است که هرگاه در فرایندهای ترمومکانیکی کرنش از مقدار بحرانی ( $\dot{\epsilon}_c$ ) لازم برای بازبلوری فراتر رود، برخی جوانه‌های بازبلوری در ماده باقی می‌مانند زیرا در مقادیر کرنش زیاد، چرخه‌های بازبلوری بعدی قبل از اتمام چرخه‌های قبلی شروع می‌شوند و در نتیجه ماده همیشه در حالت نیمه بازبلوری شده باقی می‌ماند [۴]. در FSW مقادیر کرنش بالایی ذکر شده است بنابراین ساختار به‌دست‌آمده در زیر TEM غیرهمگن و شامل دانه‌هایی بدین شرح می‌باشند: (I) دانه‌های کوچک بازبلوری شده که از جوانه‌های بازبلوری به‌وجود آمده‌اند و تقریباً عاری از نابجایی هستند، (II) دانه‌های بازبلوری شده بزرگ‌تر با چگالی

12. Stacking Fault Energy



شکل ۱. تصاویر ریزساختاری نوری و TEM از دو فلز پایه (الف، ب) فولاد 304 و (ج، د) فولاد 304،  $\gamma$ ، F و P به ترتیب آستنیت، فریت و پرلیت هستند.

و به ۵ تا ۱۱  $\mu\text{m}$  می‌رسد. با افزایش سرعت چرخش مقدار حرارت ورودی در جوش‌ها مطابق رابطه زیر بیشتر می‌شود:  
رابطه ۱.

$$q = \left(\frac{2\pi}{3V}\right) \times \mu \times P \times \omega \times R_s \times \eta$$

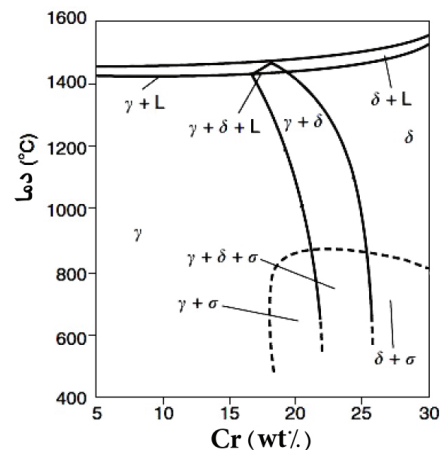
که در فرمول (۱) مقدار حرارت ورودی در واحد طول جوش  $q$  (kJ/mm)،  $\mu$  ضریب اصطکاک،  $P$  نیروی عمودی (kN)،  $\omega$  سرعت چرخش ابزار (rad/s)،  $R_s$  شعاع شانه ابزار (m)،  $V$  سرعت جوشکاری (mm/s) و  $\eta$  ضریب بازده فرایند می‌باشند [۱۴]. همچنین محققان پیشنهاد داده‌اند که حداکثر دمای حاصل در جوشکاری همزن اصطکاکی متناسب با توانی از  $(\omega^2 / V)$  می‌باشد [۱۵، ۱۶]. بنابراین با افزایش سرعت چرخش ابزار، دمای جوشکاری افزایش می‌یابد. ریزساختار در فرایندهای ترمومکانیکی مانند FSW تحت تاثیر پارامتر زرن - هولمن قرار دارد:

رابطه ۲.

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right)$$

که در آن  $Z$  پارامتر زرن - هولمن،  $\dot{\epsilon}$  نرخ کرنش،  $Q$  انرژی فعال‌سازی،  $R$  ثابت گازها و  $T$  دمای تغییرشکل است. اندازه دانه نهایی در ناحیه جوش را می‌توان از رابطه زیر تخمین زد:  
رابطه ۳.

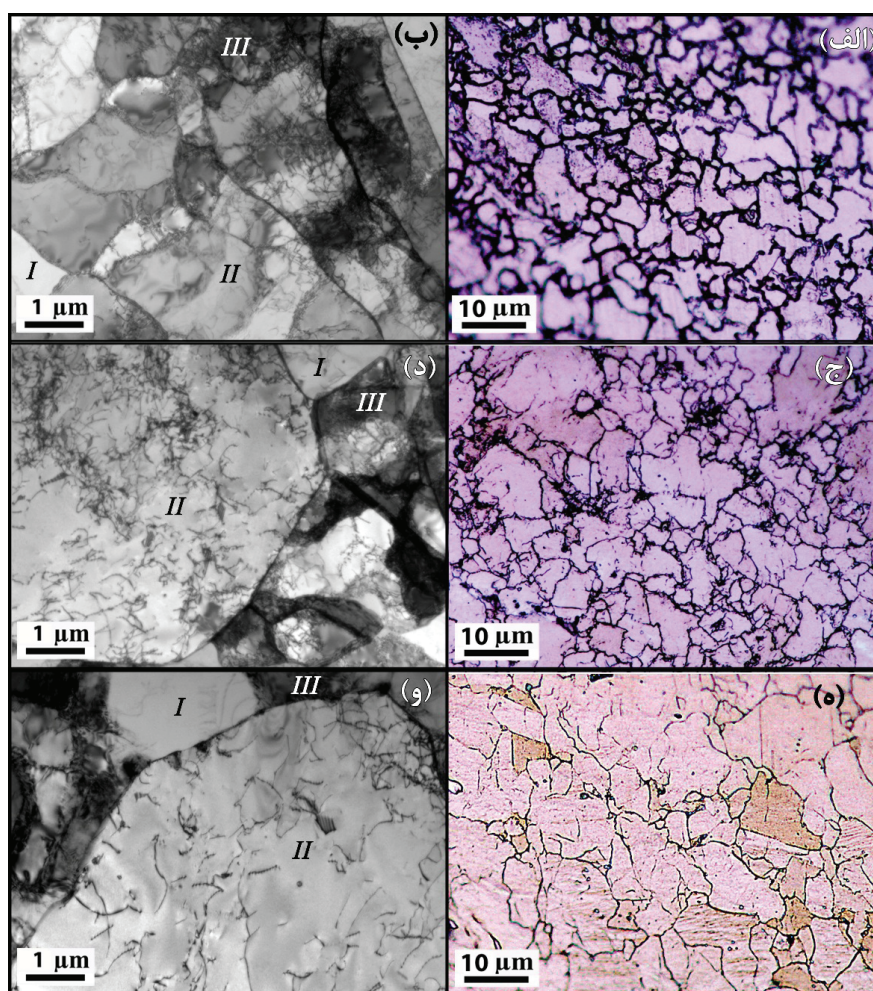
$$d = (a + b \ln Z)^{-1}$$



شکل ۲. مقطع کاذب دوتایی از سیستم Fe-Cr-Ni [۱۲].

متوسط نابجایی که به صورت پویا در حال رشد بوده‌اند یعنی از طرفی رشد مرزهای بزرگ زاویه و از بین رفتن نابجایی‌ها باعث کاهش چگالی نابجایی‌ها می‌شود و از طرف دیگر کرنش وارده به ماده باعث افزایش چگالی نابجایی‌ها می‌گردد و (III) قسمت‌های بازبلوری نشده ماده حاوی چگالی نابجایی زیاد. انواع قسمت‌های توضیح داده شده در بالا در تصاویر TEM شکل ۳ مشاهده می‌شوند که به ترتیب با علامت I، II و III مشخص شده‌اند.

متوسط اندازه دانه آستنیت در فلز پایه 304،  $18 \mu\text{m}$  است. اندازه دانه ناحیه همزده جوش‌ها در اثر بازبلوری کاهش می‌یابد



شکل ۳. تصاویر نوری و TEM از نواحی همزده فولاد 304. (الف، ب) ۴۰۰ rpm، (ج، د) ۶۰۰ rpm و (ه، و) ۸۰۰ rpm. (I) دانه‌های کوچک بازبلوری شده با چگالی کم نابجایی، (II) دانه‌های بزرگ‌تر بازبلوری شده با چگالی متوسط نابجایی و (III) ماده بازبلوری نشده حاوی چگالی نابجایی زیاد.

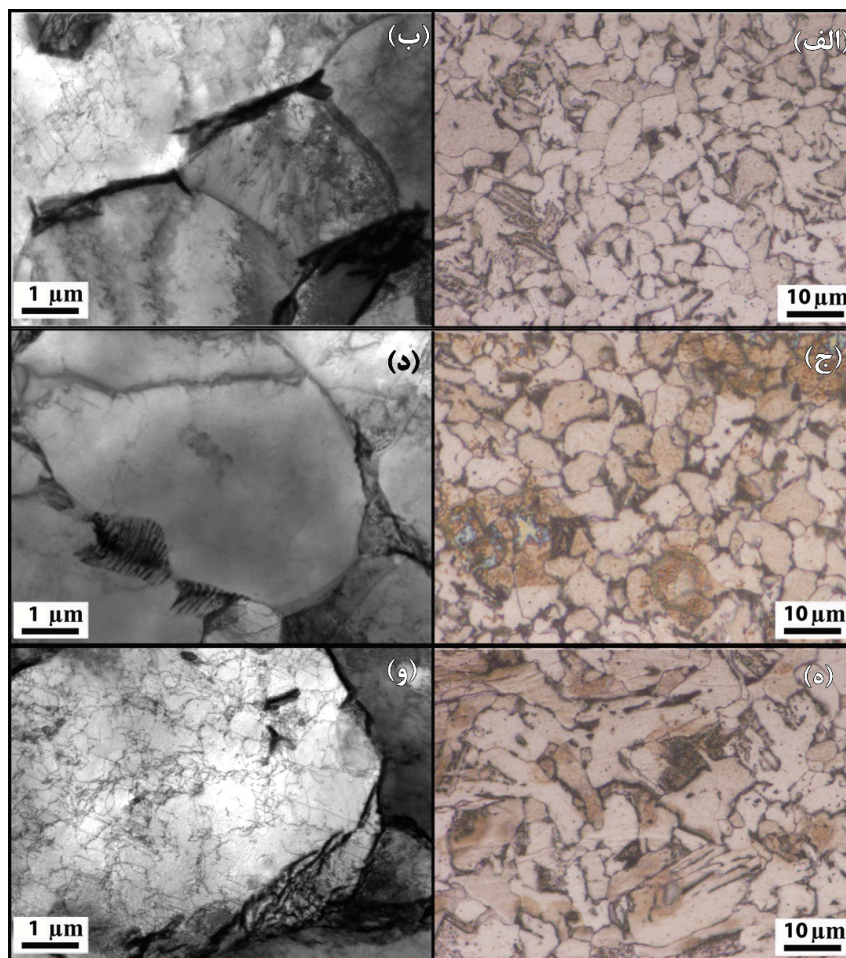
همان‌گونه که در تصویر مشاهده می‌شود افزایش سرعت چرخش ابزار جوشکاری باعث به وجود آمدن ساختار فریت - پرلیت درشت‌تری می‌شود. می‌توان استنباط نمود که افزایش سرعت چرخش باعث افزایش حرارت ورودی و در نتیجه تولید دانه‌های بزرگ‌تر آستنیت در حین جوشکاری می‌شود. این دانه‌های درشت‌تر آستنیت در حین سرد شدن، ساختار فریتی- پرلیتی درشت‌تری ایجاد می‌نمایند.

ریزسختی‌سنجی بر روی مقطع نمونه‌ها نیز انجام شد. به‌طور کلی سختی نشانگر مقاومت به تغییرشکل مومسان است. ریزسختی را می‌توان به عنوان معیاری برای استحکام موضعی مواد در نظر گرفت. بنابراین می‌توان با سختی‌سنجی، ارتباطی بین استحکام موضعی ماده با اندازه دانه در نواحی SZ و فلزات پایه در جوشکاری برقرار نمود.

معمولاً فرایند FSW منجر به افزایش استحکام و سختی در ناحیه همزده نسبت به فلز پایه می‌شود ولی استثناهایی نیز وجود دارد. در آلیاژهای دارای رسوبات استحکام‌بخش نظیر آلیاژهای سری ۲۰۰۰ و ۵۰۰۰، قسمت عمده رسوبات ناپایدار

در فرمول (۳)،  $D$  اندازه دانه،  $a$  و  $b$  مقادیر ثابت هستند [۴]. طبق روابط ذکر شده، با افزایش سرعت چرخش ابزار، دما افزایش یافته و در نتیجه پارامتر زهر - هولمن کاهش می‌یابد و بنابراین اندازه نهایی دانه‌ها بزرگ‌تر خواهد شد. این مطلب با نتایج سایر محققان نیز تطابق دارد [۱۳، ۱۷].

شکل ۴ ریزساختار نواحی همزده فولاد ۳۷st جوش‌ها را نشان می‌دهد. این نواحی عمدتاً حاوی فریت و پرلیت ریز است. دمای انجام FSW در حدود  $1000-1150^{\circ}\text{C}$  بوده است که طبق دیاگرام فازی آهن - کربن، ماده در این دماها در محدوده فاز آستنیت قرار دارد. از آنجایی که ماده در فاز آستنیتی SFE کمی دارد انتظار می‌رود که تحت بازبلوری پویای ناپیوسته قرار گیرد [۱۸]. در نتیجه دانه‌های کوچک آستنیت تولید می‌شود ولی استحاله فازی در حین سرد شدن جوش، شواهد بازبلوری را از بین برده و در نهایت ساختاری شامل فریت و پرلیت ریزتری نسبت به فلز پایه ایجاد می‌شود. تصاویر TEM در شکل ۴ وجود پرلیت ظریف و دانه‌های ریز فریت همراه با چگالی نابجایی‌های کم را نشان می‌دهد.



شکل ۴. تصاویر نوری و TEM از نواحی همزده فولاد st37. (الف، ب) ۴۰۰ rpm، (ج، د) ۶۰۰ rpm و (ه، و) ۸۰۰ rpm.

در رابطه  $H(۴)$  سختی ماده،  $D$  اندازه دانه،  $H_0$  نشان دهنده سختی ماده‌ای با اندازه دانه بین‌هایت  $K$  ثابتی نشان دهنده تأثیر مرزدانه به‌عنوان مانعی بر سر راه گسترش تغییر شکل است [۲۸، ۲۹].

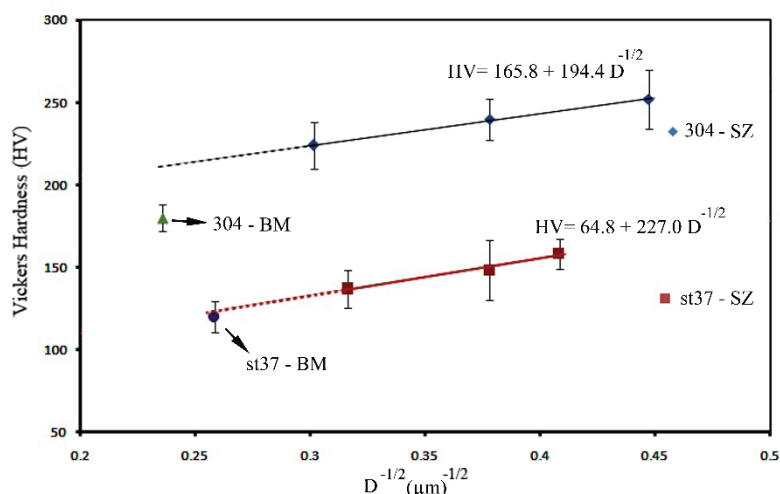
شکل ۵ مقدار متوسط سختی در نواحی همزده فولادها را بر اساس  $D^{-1/2}$  نشان می‌دهد که  $D$  نماینده اندازه دانه متوسط دانه‌های آستنیت (در فولاد 304) و اندازه متوسط دانه‌های فریت (در فولاد st37) است. فولاد پایه 304 دارای دانه‌های درشت آستنیت با سختی حدود  $180 \text{ HV}$  می‌باشد. از آنجایی که دو ماده مختلف در ناحیه همزده جوش‌ها وجود دارد، رابطه هال - پیچ به‌طور مجزا برای هر دو فولاد با استفاده از روش برازش حداقل مربعات وزنی  $[۳۰]$  بررسی شده است. سختی  $SZ$  فولاد 304 از رابطه  $HV = 165.8 + 194.4D^{-1/2}$  همان‌طور که در شکل ۵ دیده می‌شود پیروی می‌کند. همان‌طور که در شکل ۵ دیده می‌شود سختی فلز پایه 304 روی خط برون‌یابی شده نواحی  $SZ$  قرار نمی‌گیرد. به‌بیان دیگر سختی نواحی  $SZ$  کمی بیشتر از سختی  $BM$  است (به‌غیر از اثر اندازه دانه). این موضوع را می‌توان به وجود نابجایی‌های بیشتر در نواحی همزده نسبت به فلز

در زمینه حل‌شده و بقیه آن‌ها تبدیل به رسوبات پایدارتر می‌شوند که این موضوع باعث افت سختی ناحیه همزده می‌گردد [۱۹-۲۵]. همچنین در مورد فولاد گزارش شده است که وقتی فلز پایه در حالت مارتنزیتی قرار دارد، ناحیه همزده دچار افت سختی خواهد شد زیرا FSW اثر استحکام‌بخشی مارتنزیتی را از بین برده و ساختار جدید بازبلوری شده‌ای را ایجاد می‌نماید [۲۶]. از آنجایی که هیچ‌یک از دو فلز پایه در حالت مارتنزیتی نیستند بلکه در حالت آنیل قرار دارند و مسئله حل شدن رسوبات استحکام‌بخش در حین FSW نیز در آن‌ها مطرح نیست، وقوع بازبلوری در نواحی همزده جوش‌ها منجر به افزایش سختی این نواحی نسبت به فلزات پایه مربوطه شده است. این افزایش سختی به دلیل ریزدانه شدن نواحی همزده هر دو فولاد نسبت به فلزات پایه مربوطه می‌باشد، همان‌طور که در شکل‌های ۳ و ۴ دیده می‌شود. افزایش سختی در نواحی همزده جوش‌ها به دلیل کاهش اندازه دانه را می‌توان طبق رابطه هال - پیچ [۲۷] تفسیر کرد:

رابطه ۴:

$$H = H_0 + KD^{-1/2}$$

13. Weighted least-squares fit



شکل ۵. ارتباط بین سختی (HV) و اندازه دانه (D) نواحی همزده در فولادهای 304 و st37.

سختی نواحی همزده در هر دو فولاد از رابطه هال - پیچ پیروی می کند. مقادیر سختی در فلز پایه و نواحی همزده فولاد st37 روی یک خط هال - پیچ قرار می گیرند زیرا دارای ساختار مشابه فریتی - پرلیتی با چگالی نابجایی کمی می باشند. اما در مورد فولاد 304 به دلیل وجود نابجایی نسبتاً بیشتر در نواحی همزده، سختی فلز پایه و نواحی همزده روی یک خط هال - پیچ یکسان قرار نمی گیرند که این امر را می توان مربوط به افزایش مقاومت شبکه ماده دانست.

پایه 304 مربوط دانست. نواحی همزده دچار بازبلوری پویا می شوند که بنابراین مقدار بیشتری نابجایی در ماده نسبت به حالت بازبلوری ایستا باقی می ماند. می توان نتیجه گیری نمود که وجود نابجایی های بیشتر در نواحی همزده فولاد 304،  $H_0$  را به عنوان مقاومت زمینه ماده در مقابل حرکت نابجایی ها افزایش می دهد. بنابراین سختی فلز پایه و نواحی همزده فولاد 304 روی یک خط قرار نخواهند گرفت.

سختی فلز پایه فولاد st37 در حدود HV 120 می باشد. سختی نواحی همزده جوش ها در قسمت فولاد st37 از رابطه  $HV = 64.8 + 227.0D^{-1/2}$  پیروی می کند. فلز پایه st37 نیز تقریباً روی خط برون یابی شده نواحی SZ قرار می گیرد. ریزساختار فلز پایه و نواحی همزده st37 از نظر چگالی نابجایی مشابه هم هستند و هر دو دارای نابجایی های نسبتاً کمی هستند. همان طور که ذکر شد فولاد st37 نیز مشابه فولاد 304 تحت بازبلوری پویا قرار می گیرد اما استحاله آلوتروپی در حین سرد شدن جوش باعث از بین رفتن شواهد بازبلوری پویا شده و ساختار جدید فریتی - پرلیتی جدیدی به وجود می آورد. بنابراین، نواحی همزده و فلز پایه فولاد st37 از رابطه هال - پیچ یکسانی پیروی می کنند.

#### ۴. نتیجه گیری

روش FSW با موفقیت برای تولید جوش های سالم غیرهمجنس بین فولاد ۳۰۴ و st37 به کار گرفته شد. ریزساختار نواحی همزده فولاد ۳۰۴ دانه های بازبلوری شده با اندازه های متفاوت و چگالی نابجایی مختلف را نشان می دهند که نمایانگر وقوع بازبلوری پویا هستند. در نواحی همزده فولاد st37 وقوع استحاله در حین سرد شدن پس از جوشکاری، شواهد وقوع بازبلوری پویا از بین می رود و ریزساختار فریتی - پرلیتی ظریف حاوی چگالی نابجایی کم به وجود می آید.

## References

- [1] Mishra RS, Ma ZY. Friction stir welding and processing. *Materials Science and Engineering: R: Reports*. 2005;50(1):1-78.
- [2] Thomas WM, Nicholas ED, Needham JC, Murch MG, Temple-smith P, Dawes CJ, inventors. *friction stir welding* 1991.
- [3] Sato YS, Nelson TW, Sterling CJ. Recrystallization in type 304L stainless steel during friction stirring. *Acta Materialia*. 2005;53(3):637-45.
- [4] F. J. Humphreys, Hotherly M. *Recrystallization and Related Annealing Phenomena*. 2nd ed. New York: Pergamon Press; 1995.
- [5] R. Nandan, T. DebRoy, Bhadeshia HKDH. Recent advances in friction-stir welding – Process, weldment structure and properties. *Progress in Materials Science*. 2008;53:980-1023.
- [6] Sato YS, Urata M, Kokawa H, Ikeda K. Hall-Petch relationship in friction stir welds of equal channel angular-pressed aluminium alloys. *Materials Science and Engineering: A*. 2003;354(1):298-305.
- [7] Sato YS, Park SHC, Kokawa H. Microstructural factors governing hardness in friction-stir welds of solid-solution-hardened Al alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2001;32(12):3033-42.
- [8] Park SHC, Sato YS, Kokawa H. Microstructural evolution and its effect on Hall-Petch relationship in friction stir welding of thixomolded Mg alloy AZ91D. *Journal of Materials Science*. 2003;38(21):4379-83.
- [9] Xie GM, Ma ZY, Geng L. Development of a fine-grained microstructure and the properties of a nugget zone in friction stir welded pure copper. *Scripta Materialia*. 2007;57(2):73-6.
- [10] Yabuuchi K, Tsuda N, Kimura A, Morisada Y, Fujii H, Serizawa H, et al. Effects of tool rotation speed on the mechanical properties and microstructure of friction stir welded ODS steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2014;595(Supplement C):291-6.
- [11] Kurt B. The interface morphology of diffusion bonded dissimilar stainless steel and medium carbon steel couples. *Journal of Materials Processing Technology*. 2007;190(1):138-41.
- [12] J. C. Lippold, Kotecki DJ. *Welding metallurgy and weldability of stainless steels*. 1st ed. New Jersey: John Wiley & Sons; 2005.
- [13] Reynolds AP, Tang W, Gnapel-Herold T, Prask H. Structure, properties, and residual stress of 304L stainless steel friction stir welds. *Scripta Materialia*. 2003;48(9):1289-94.
- [14] Lakshminarayanan AK, Balasubramanian V, Salahuddin M. Microstructure, Tensile and Impact Toughness Properties of Friction Stir Welded Mild Steel. *Journal of Iron and Steel Research, International*. 2010;17(10):68-74.
- [15] Ren SR, Ma ZY, Chen LQ. Effect of welding parameters on tensile properties and fracture behavior of friction stir welded Al-Mg-Si alloy. *Scripta Materialia*. 2007;56(1):69-72.
- [16] Bisadi H, Tavakoli A, Tour Sangsaraki M, Tour Sangsaraki K. The influences of rotational and welding speeds on microstructures and mechanical properties of friction stir welded Al5083 and commercially pure copper sheets lap joints. *Materials & Design*. 2013;43(Supplement C):80-8.
- [17] Sato YS, Urata M, Kokawa H. Parameters controlling microstructure and hardness during friction-stir welding of precipitation-hardenable aluminum alloy 6063. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2002;33(3):625-35.
- [18] Lienert TJ, Stellwag Jr WL, Grimmer BB, Warke RW. Friction Stir Welding Studies on Mild Steel. supplement to the welding journal. 2003:1s-9s.
- [19] J.Q. Li, Liu HJ. Effects of the Reversely Rotating Assisted Shoulder on Microstructures During the Reverse Dual-rotation Friction Stir Welding. *Journal of Materials Science & Technology*. 2015;31:375-83.
- [20] D.A. Wadson, X. Zhou, G.E. Thompson, P. Skeldon, L. Djapic Oosterkamp, Scamans G. Corrosion behaviour of friction stir welded AA7108 T79 aluminium alloy. *Corrosion Science*. 2005.
- [21] Li JQ, Liu HJ. Effects of the Reversely Rotating Assisted Shoulder on Microstructures During the Reverse Dual-rotation Friction Stir Welding. *Journal of Materials Science & Technology*. 2015;31(4):375-83.
- [22] Benavides S, Li Y, Murr LE, Brown D, McClure JC. Low-temperature friction-stir welding of 2024 aluminum. 1999.
- [23] Genevois C, Deschamps A, Denquin A, Doisneau-cottignies B. Quantitative investigation of precipitation and mechanical behaviour for AA2024 friction stir welds. *Acta Materialia*. 2005;53(8):2447-58.
- [24] Wang BB, Chen FF, Liu F, Wang WG, Xue P, Ma ZY. Enhanced Mechanical Properties of Friction Stir Welded 5083Al-H19 Joints with Additional Water Cooling. *Journal of Materials Science & Technology*. 2017;33(9):1009-14.
- [25] Kamal Babu K, Panneerselvam K, Sathiya P, Haq AN, Sundarajan S, Mastanaiah P, et al. Influences of metastable  $\theta'$ ,  $\theta''$  and stable  $\theta$  intermetallics formed during cryorolling and friction stir welding process on AA2219. *Journal of Alloys and Compounds*. 2018;732:624-9.
- [26] Ueji R, Fujii H, Cui L, Nishioka A, Kunishige K, Nogi K. Friction stir welding of ultrafine grained plain low-carbon steel formed by the martensite process. *Materials Science and Engineering: A*. 2006;423(1):324-30.
- [27] Dieter GE. *Mechanical metallurgy*. 3rd ed: McGraw-Hill book company, London; 1988.
- [28] Di Schino A, Kenny JM. Grain refinement strengthening of a micro-crystalline high nitrogen austenitic stainless steel. *Materials Letters*. 2003;57(12):1830-4.
- [29] Di Schino A, Barteri M, Kenny JM. Effects of grain size on the properties of a low nickel austenitic stainless steel. *Journal of Materials Science*. 2003;38(23):4725-33.
- [30] I.G. Hughes, Hase TPA. *Measurement and their uncertainties*. New York: Oxford university press; 2010.