E-ISSN: 2676-6787 | P-ISSN: 2476-583X

Journal of
Welding Science and Technology of Iran
jwsti.iut.ac.ir

Volume 12, Number 1, 2026



Effect of forge pressure on microstructure and mechanical properties of rotary friction welding of SS 304 to different plain carbon steels

S. A. Mousavi Mohammadi, S. R. Elmi Hosseini*
School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Narmak, Tehran 13114-16846, Iran.

Received 15 February 2026 ; Accepted 12 June 2026

Abstract

In this research, the influence of various forge pressure values and also the chemical composition of different carbon steels on rotary friction welding of SS 304 to carbon steels has been investigated. The steel rods of AISI 1015, 1030, and 1045 have been RFWed to SS 304 using 20, 40, and 80 bar forge pressure. Results indicated the 40 bar forge pressure as the optimum value, and by applying pressures below this number, the material flow in the weld interface would be tackled, resulting in improper mechanical values. By exceeding the optimum forge pressure, most of the viscoplastic material inside the weld interface would be rejected from that area in the form of flash, causing the weld to be done at a relatively low temperature. Microstructural investigation has been done by optical and scanning electron microscopes. Results showed that the weld zone is extremely fine due to DRX, and in the interface, a pro-eutectoid ferrite layer is formed, which has an increasing width when the heat input increases. Tensile test results showed that the optimum weld specimen is the RFW of AISI 1030 to SS 304 using 40 bar forge pressure, 40 bar friction pressure, 5s friction time, and 1500 RPM rotational speed. This specimen has shown 116 % joint efficiency and 715 MPa ultimate tensile strength.

Keywords: Rotary Friction Welding, Mechanical Properties, Forge Pressure, Stainless Steel.

*Corresponding Author: S. R. Elmi Hosseini, elmihosseini@iust.ac.ir.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.22]

شاپا: 2476-583X | شاپا الکترونیکی: 2676-6787

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران

jwsti.iut.ac.ir

سال دوازدهم، شماره1، بهار و تابستان 1405



اثر فشار فورج بر ریزساختار و خواص مکانیکی جوشکاری اصطکاکی دورانی غیرمشابه فولاد زنگ‌نزن 304 به فولادهای ساده کربنی

سید علی موسوی محمدی، سید رضا علمی حسینی *

دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران،کدپستی16846-1311، ایران.

دریافت مقاله: 1404/11/26 ؛ پذیرش مقاله: 1405/03/22

چکیده

در این تحقیق، اثر میزان فشار فورج و درصد کربن بر خواص مکانیکی و ریزساختار جوش اصطکاکی دورانی ناهمسان فولاد زنگ‌نزن 304 به انواع فولاد ساده کربنی بررسی شد. شفت‌های فولادی Ck15، Ck30 و Ck45 با فشار فورج 20، 40 و 80 بار به فولاد SS304 جوشکاری شدند. نتایج نشان داد که پارامتر فشار فورج مقدار بهینهٔ 40 بار دارد و با کاهش این فشار، سیلان مواد در فصل مشترک کاهش یافته و کیفیت اتصال افت می‌کند. همچنین، با افزایش فشار فورج بیش از حد بهینه، بیشتر مادهٔ ویسکو پلاستیک بیرون زده و اتصال در دمای پایین شکل می‌گیرد. بررسی‌های ریزساختاری به کمک میکروسکوپ نوری و الکترونی انجام گرفت. نتایج نشان داد که ریزساختار مقطع جوش متشکل از دانه‌های بسیار ریز ناشی از تبلور مجدد دینامیکی است. همچنین در مقطع جوش، یک ناحیهٔ فریت پرویوتکتویید تشکیل شده است که با افزایش حرارت ورودی بر ضخامت آن افزوده می‌شود. همچنین نتایج آزمایش کشش نشان داد که بهینه‌ترین نمونه با بازدهی 116 درصد و استحکام کششی 715 مگاپاسکال، با جوشکاری اصطکاکی دورانی فولاد Ck30 و SS304 به دست آمده است که پارامترهای آن فشار فورج 40 بار، فشار اصطکاک 40 بار، زمان اصطکاک 5 ثانیه و سرعت دورانی 1500 دور بر دقیقه هستند.

کلمات کلیدی: جوشکاری اصطکاکی دورانی، خواص مکانیکی، فشار فورج، جوشکاری فولاد زنگ‌نزن.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: سید رضا علمی حسینی،elmihosseini@iust.ac.ir .

1- مقدمه

با پیشرفت صنایع گوناگون مانند صنعت کشتی‌سازی، خودرو و به خصوص الکتروپمپ سازی، اهداف مهمی مثل کاهش‌هزینه‌ها با جوشکاری فولادهای ارزان‌تر (مانند فولادهای ساده کربنی) به فولادهای گران قیمت‌تر مانند انواع فولادهای زنگ‌نزن در این صنایع دنبال می‌شود [1و2]. فولادهای ساده کربنی به دلیل در دسترس بودن، مقرون به صرفه بودن و جوش پذیری خوب در صنایع مورد استفاده هستند. فولادهای زنگ نزن به ویژه گروه 300 (آستنیتی)، به واسطه درصد عناصر آلیاژی بالا، در هنگام جوشکاری ذوبی مستعد عیوب بسیار جدی نظیر رسوبات ترد کاربیدی، ترک گرم و تجمع عنصری هستند. در جوشکاری ذوبی ناهمسان فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی و ساده کربنی، مشکلات ناشی از رسوبات کاربیدی تشدید می‌شود [3-5].

در تحقیق هویون و همکاران [6]، با بررسی جوشکاری ذوبی به روش لیزر بین فولاد زنگ‌نزن و فولاد Ck45، عیوب بسیار

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.22]

زیادی مانند کاربیدهای کروم درشت در مرزدانه و همچنین مارتنزیت تمپر نشده کشیده در مقطع جوش مشاهده گردید که باعث افت شدید خواص مکانیکی مقطع جوش شدند. بایستی توجه داشت که دمای بسیار بالای روش‌های جوشکاری ذوبی، شرایط ذوب و انجماد کاملا غیر تعادلی را به قطعه تحمیل می کنند و از طرف دیگر دمای بالا شرایط را برای تشکیل فازهای نفوذی مانند کاربید کروم یا تجمع عناصر آلیاژی مهیا می‌کند [7]. برای دوری جستن از معایب ذکر شده، روش‌های جوشکاری حالت جامد برای جوشکاری ناهمسان آلیاژهای پایه آهن توسعه پیدا کردند. یکی از این روش‌ها جوشکاری اصطکاکی دورانی است[8].

روش جوشکاری اصطکاکی دورانی به دلیل نوین‌تر بودن آن به نسبت بسیاری از روش‌های ذوبی، در سال‌های اخیر مورد توجه صنایع واقع شده و به همین دلیل نیز بهینه سازی و بررسی پارامترهای آن از اهمیت مضاعفی برخوردار است[10و9]. در این روش جوشکاری حرارت ورودی از طریق چرخش مواد (معمولا میله) بر روی یکدیگر تامین می‌شود[11]. در این مرحله و در مدت زمان و فشار اصطکاک معین، بخشی از فلزات در تماس در فصل مشترک، ویسکوپلاستیک شده و در نهایت به واسطهٔ فشار فورج نهایی سیلان به سمت بیرون اتفاق افتاده و پلیسه تشکل می‌شود و جوش حاصل می‌گردد. حال طبق توضیحات مذکور، چهار پارامتر بسیار مهم این فرایند، سرعت دورانی، فشار اصطکاک، فشار فورج و زمان اصطکاک هستند[12]. با افزایش سرعت دورانی، حرارت ورودی به صورت غیر خطی افزایش پیدا می‌کند و به واسطهٔ سرعت نسبی بسیار کمتر نواحی مرکزی، این عمل باعث بهبود کیفیت جوش در قسمت مرکزی جوش می‌شود. پارامترهای فشار اصطکاک و زمان اصطکاک مقدار بهینه دارند و با فراتر رفتن از این حد بهینه، کیفیت اتصال افت قابل توجهی پیدا خواهد کرد[13].

فیرماندو و همکاران[14] پس از بررسی اثر افزایش پارامترهای فشار و زمان اصطکاک بر جوشکاری اصطکاکی دورانی فولاد کم کربن به فولاد زنگ‌نزن 304 پی بردند که خواص استحکامی نمونه‌ها با افزایش زمان اصطکاک از 4 تا 8 ثانیه و فشار اصطکاک از 16 تا 54 مگاپاسکال، افزایش یافته است؛ اما پس از آن خواص استحکامی روند نزولی به خود می‌گیرند که رشد شدید دانه در اکثر مناطق، علت این امر گزارش شده است. پاونتان و همکاران [15] نیز در تحقیقی مشابه با افزایش زمان و فشار اصطکاک از 2 ثانیه و 50 مگاپاسکال به 10 ثانیه و 110 مگاپاسکال در طی چندین مرحله، گزارش کردند که حداکثر استحکام و چقرمگی برای نمونهٔ جوشکاری شده در زمان اصطکاک 6 ثانیه و فشار اصطکاک 90 مگاپاسکال بوده است.

آلپی جمیز و همکاران [16] پس از پوشش سطح میله‌های فولادی ساده با 50 نانومتر نیکل، گزارش داده‌اند که در جوشکاری اصطکاکی دورانی این فولادها با فولاد زنگ‌نزن، خواص استحکامی در حدود 20 مگاپاسکال بهتر از نمونهٔ جوش داده شده بدون لایهٔ میانی است. در ادامهٔ همین تحقیق، هونگ ما و همکارانش [17]، با بررسی مقطع جوش نمونه‌های جوشکاری شده مشابه شرایط تحقیق قبل در زیر میکروسکوپ الکترونی عبوری، نشان دادند که افزودن نیکل، سبب تشکیل کاربیدهای چقرمهٔ Ni_3C و NiFeC در مقطع جوش می‌شود و به همین علت تا حد قابل توجهی مانع تشکیل کروم کاربید گرفته شده است. بررسی مطالعات نشان داد که تحقیقات صورت گرفته بر روی ارتباط میان خواص مکانیکی جوش اصطکاکی دورانی با درصد کربن فولاد و پارامتر حیاتی مانند فشار فورج بسیار کم و پراکنده است. به همین سبب در این پژوهش، به بررسی تاثیر فشار فورج‌های گوناگون در جوشکاری ناهمسان فولاد زنگ‌نزن 304 به انواع فولادهای ساده کربنی پرداخته شده است. تعیین پارامترهای ثابت و متغیر این تحقیق، به واسطه‌ی صنعتی بودن پروژه و نیاز صنعت الکتروپمپ سازی تعیین شده است.

2- مواد و روش‌ها

در پژوهش حاضر از چهار فولاد SS 304، AISI 1015، AISI 1030 و AISI 1045 با قطرهای 20 میلی‌متر و ترکیب شیمیایی مطابق جدول (1) استفاده شده است. لازم به ذکر است که ترکیب‌شیمیایی فولادها با استفاده از آزمون کوانتومتری تعیین

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

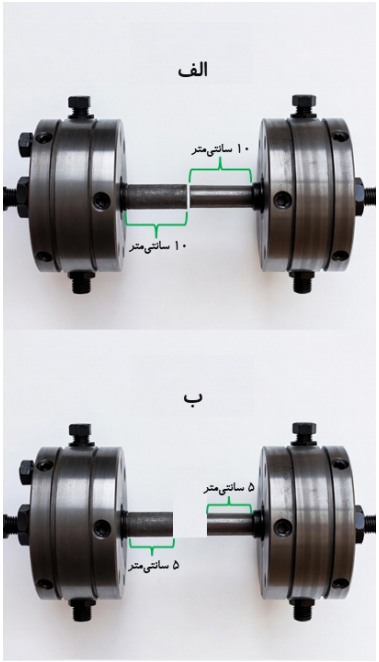
[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.22]

شده است.

جدول 1- ترکیب شیمیایی فولادهای کربنی و زنگ‌نزن مورد استفاده در این پژوهش.

آلیاژ	درصد وزنی عناصر						
	Fe	C	Ni	Cr	S	P	Mn
AISI 1015	پایه	۰/۱۴	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۰۳	۰/۰۰۳	۰/۳
AISI 1030	پایه	۰/ ۳۶	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۹۰	۰/۰۶۰	۰/۶
AISI 1045	پایه	۰/۴۴	۰/۱۸	۰/۰۱	۰/۰۱۰	۰/۰۴۰	۰/۷
AISI 304	پایه	۰/۰۶	۹/۸۸	۱۹/۰	۰/۰۰۲	۰/۰۳۰	۱/۸

برای انجام فرایند جوشکاری، شفت‌ها به کمک ارۀ آهن‌بر آبگرد به طول‌های 10 و 5 سانتی‌متر برش داده شدند. پس از آن، نمونه‌ها مطابق شکل (1) به سه نظام دستگاه جوشکاری اصطکاکی دورانی مدل FRHW-1015 ساخت شرکت یادمان صنعت پاسارگاد متصل شدند و جوشکاری مطابق پارامترهای نشان داده شده در جدول (2) انجام شد. نمونه‌های جوشکاری شده با شفت‌های 10 سانتی‌متری (شکل (1-الف) به منظور ساخت نمونه‌های آزمایش کشش استفاده شدند (استاندارد ASTM E8). برای هر نمونۀ جوشکاری شده بر اساس پارامترهای جدول 2، سه نمونۀ آزمایش کشش تهیه شد (در کل 27 نمونه آزمون کشش). این در حالی است که نمونه‌های جوشکاری شده با شفت‌های 5 سانتی‌متری (شکل (1-ب) برای برش و تهیۀ نمونه‌های متالوگرافی و سختی سنجی استفاده شدند. در جدول (2) پارامترهای جوشکاری اصطکاکی دورانی فولادهای کربنی به فولاد زنگ‌نزن نشان داده شده است. پارامترهای ثابت به ترتیب فشار اصطکاک، زمان اصطکاک و سرعت دورانی دستگاه هستند که به ترتیب برابر با 40 بار، 5 ثانیه و 1500 دور بر دقیقه است. پارامترهای متغیر در این تحقیق، ترکیب شیمیایی فولاد ساده کربنی و فشار فورج هستند (جدول 2). پس از جوشکاری، نمونه‌های جوشکاری شده با شفت‌های 10 سانتی‌متری مطابق استاندارد کشش ASTM E8 آماده شدند (شکل 2) و آزمایش کشش در نرخ کرنش 1 میلی متر بر دقیقه انجام شد.



شکل 1- نحوۀ بسته شدن فولادها به سه نظام دستگاه جوشکاری اصطکاکی دورانی با دو طول مختلف الف- 10 سانتی متری و ب- 5 سانتی متری.

جدول 2- نامگذاری و پارامترهای جوشکاری اصطکاکی دورانی فولاد زنگ نزن به انواع فولاد کربنی.

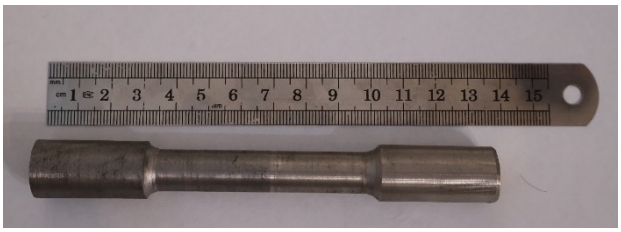
نام نمونه	اتصال	فشار فورج (مگاپاسکال)
A_{52}	SS 304/CK15	20
A_{54}	SS 304/CK15	40
A_{58}	SS 304/CK15	80
B_{52}	SS 304/CK30	20
B_{54}	SS 304/CK30	40
B_{58}	SS 304/CK30	80
C_{52}	SS 304/CK45	20
C_{54}	SS 304/CK45	40
C_{58}	SS 304/CK45	80

در این پژوهش از دستگاه آزمایش کشش 50 تنی (مدل STM-150) استفاده شد. همچنین، به منظور بررسی‌های ریزسختی سنجی و ریزساختاری، نمونه‌های 5 سانتی‌متری در راستای مقطع اتصال برش داده شدند. پس از برشکاری و مانت سرد،

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.22]

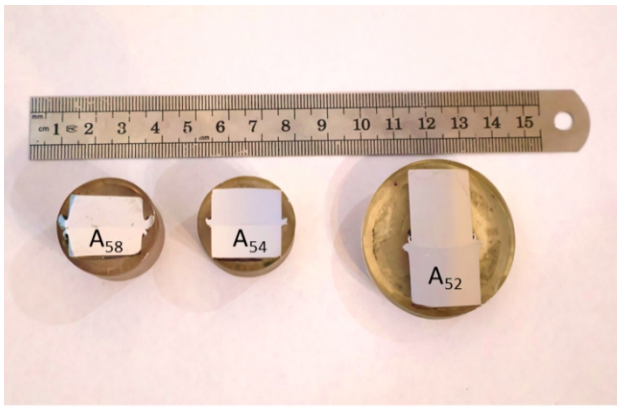
سمباده‌زنی تا عدد مش 3000 انجام گرفت و درنهایت نمونه‌ها با استفاده از سوسپانسیون آلومینا پولیش شدند (بر اساس استاندارد ASTM E340). پس از پولیش، یکبار فصل مشترک با نایتال دو درصد و یکبار با هیدروکلرید 40 درصد حکاکی شد و سپس بررسی‌های ریزساختاری به کمک میکروسکوپ نوری مدل HUVITZ انجام گرفت. همچنین بررسی فصل مشترک جوش و نحوهٔ توزیع عناصر آلیاژی نیز به کمک میکروسکوپ الکترونی (Tescan Vega II XMU) مجهز به ابزار EDS (طیف سنجی پراش پرتوی ایکس) انجام گرفت. در نهایت نیز آزمایش ریزسختی تحت بار 200 گرم در مدت زمان 15 ثانیه برای هر نقطه انجام پذیرفت. این آزمایش با دستگاه ISH-TDV1000 و مطابق استاندارد ASTM C 730 انجام گرفت.



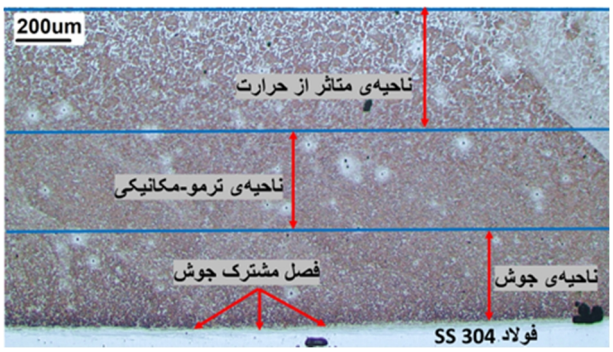
شکل 2- نمونهٔ آماده شده برای انجام آزمایش کشش مطابق استاندارد ASTM E8.

3- نتایج و بحث

شکل (3) تصویری از سطح مقطع نمونه‌های جوشکاری شدهٔ فولاد Ck15 را در 3 فشار فورج متفاوت نشان می‌دهد. با دقت در تصویر، می‌توان مشاهده کرد که با افزایش فشار فورج (از راست به چپ)، میزان زائده تشکیل شده در نواحی حاشیه افزایش یافته است [1]. رویهٔ مشاهده شده برای فولادهای Ck30 و Ck45 نیز قابل مشاهده است. به طور کلی فشار فورج در روش جوشکاری اصطکاکی دورانی، وظیفه‌ی ایجاد سیلان شدید در ماده‌ی ویسکوپلاستیک به وجود آمده در فصل مشترک جوش و تشکیل دادن قفل مکانیکی را دارد. شکل (4) تصویر میکروسکوپ نوری در بزرگ‌نمایی کم را برای مقطع جوش نمونه C_{58} نشان می‌دهد. هدف از شکل، نمایش نواحی مختلف مقطع جوش نمونه‌های جوشکاری شده به روش جوشکاری اصطکاکی دورانی است که این نواحی به ترتیب ناحیه جوش (WZ)، ناحیه ترمومکانیکی (TMAZ) و ناحیه متاثر از حرارت (HAZ) نام دارند و در جوشکاری اصطکاکی دورانی همسان و ناهمسان در هر دو طرف فصل مشترک جوش به وجود می‌آیند. این نواحی و تغییرات مرتبط به آن‌ها به تفضیل در بخش ریزساختار مورد تحلیل قرار گرفته است.



شکل 3- تصویر سطح مقطع سه نمونهٔ A_{52}، A_{54} و A_{58} که به صورت عرضی برش داده شده‌اند.

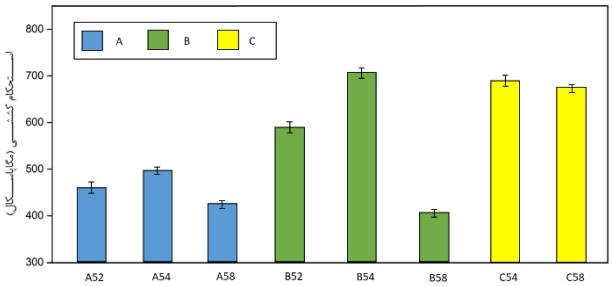


شکل 4- تصویر مقطع جوش نمونه C_{58}.

اندازه دانه‌های پایه سه فولاد Ck15، Ck30 و Ck45 به ترتیب 94، 117 و 115 میکرومتر است. در شکل (5) نتایج آزمایش کشش تمامی نمونه‌های جوشکاری شده نشان داده است. با دقت در شکل (5)، برای هر سه فولاد Ck15، Ck30 و Ck45 می‌توان یک روند مشابهی را میان استحکام کششی نهایی و فشار فورج اعمالی مشاهده کرد. مشاهده می‌شود که مقادیر استحکام کششی نهایی به‌دست آمده برای عدد فشار فورج 40 بار نسبت به 20 و 80 بار مقادیری بهینه بوده و بهترین خواص مکانیکی را منجر می‌شود. با اعمال مقادیر فشار فورج زیر عدد

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.22]

بحرانی (در این تحقیق 20 بار)، اتصال و قفل مکانیکی ناشی از سیلان ماده در فصل مشترک به درستی شکل نمی‌گیرد و در نتیجه، خواص کششی جوش کاهش می‌یابد. اما این مسئله همواره صادق نیست؛ چراکه با افزایش بیش از حد فشار فورج نیز (در این تحقیق 80 بار) مقادیر بسیار زیادی مادهٔ ویسکوپلاستیک از مقطع جوش به صورت پلیسه خارج شده و دو فصل مشترک فلزی سرد به یکدیگر می‌رسند که به سبب پایین‌تر بودن دمای اتصال، پیوندهای اتمی ضعیف‌تری تشکیل می‌شود و خواص مکانیکی مقطع جوش افت می‌کند [1, 18].



شکل 5- نتایج آزمایش کشش انجام گرفته بر روی تمامی نمونه‌های سری A، سری B و سری C.

جدول 3- نتایج آزمایش کشش اتصال اصطکاکی دورانی انواع فولاد کربنی به فولاد زنگ نزن

نام نمونه	استحکام کششی (مگاپاسکال)	بازدهی (درصد)	محل شکست
A_{52}	433	105	فلز پایه
A_{54}	501	122	فلز پایه
A_{58}	436	106	فلز پایه
B_{52}	585	101	فلز پایه
B_{54}	715	116	فلز پایه
B_{58}	405	67	مقطع جوش
C_{52}	-	-	-
C_{54}	691	107	فلز پایه
C_{58}	665	104	فلز پایه

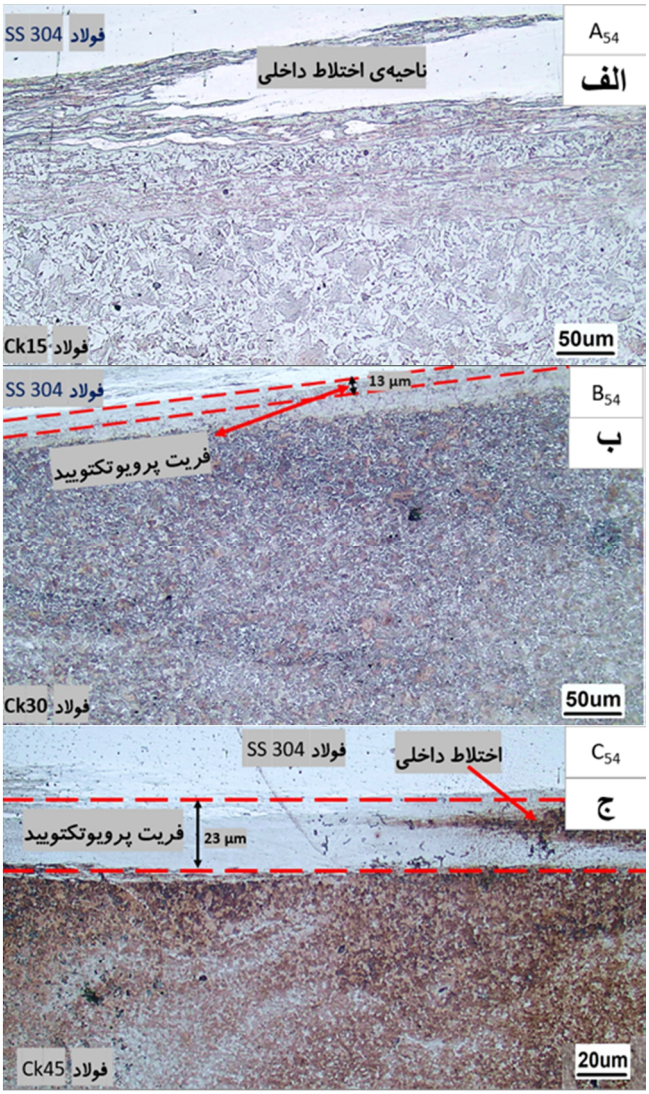
به دلیل عدم اتصال ناشی از فشار فورج کم، نتایج مربوط به نمونهٔ C_{52}، در شکل (5) نشان داده نشده است. سختی و سختی گرم فولاد Ck45 به نسبت دو فولاد Ck15 و Ck30 بالاتر است و به همین سبب سیلان ماده در فصل مشترک جوش سخت‌تر است و در نتیجه نقش فشار فورج در جوشکاری آن حائز اهمیت است. به همین سبب نیز تمامی نمونه‌های C_{52} در ایجاد اتصال ناموفق بوده‌اند. جدول (3) مقادیر میانگین به دست آمده از آزمایش کشش‌های انجام شده به همراه محل شکست نمونه‌ها را نشان می‌دهد. تنها یک نمونه بازدهی زیر 100 درصد داشته است (نمونه B_{52}).

3-1-ریزساختار

به منظور بررسی تاثیر افزایش میزان درصد کربن سمت فولاد ساده کربنی بر ریزساختار مقطع جوش اصطکاکی دورانی سه فولاد Ck15، Ck30 و Ck45 به فولاد زنگ‌نزن 304، تصاویر ریزساختاری آن‌ها در شکل (6و 7) نشان داده شده است. با افزایش درصد کربن در سمت فولاد کربنی، درصد پرلیت زمینه افزایش پیدا می‌کند و به همین سبب سختی نیز با افزایش درصد کربن در این فولادها، روندی افزایشی خواهد داشت. از این رو که حرارت ورودی این فرایند بسته به اصطکاک دو فلز بر روی یکدیگر است، در پارامترهای جوشکاری کاملا ثابت، بدیهی است که ماده با بیشترین سختی، بیشترین حرارت ورودی را نیز تولید کند. حرارت ورودی بیشتر به معنای نفوذ پذیری بهتر اتم‌های کربن در نزدیکی فصل مشترک است [19]. بنابراین همان‌گونه که در شکل (6) نیز آشکار است، با افزایش درصد کربن از نمونهٔ A_{54} به سمت C_{54}، میزان فریت پرویوتکتوییدی تشکیل شده در فصل مشترک و در سمت فولاد ساده کربنی افزایش قابل توجهی داشته است به نحوی که میزان ضخامت این ناحیه برای سه نمونه A_{54}، B_{54} و C_{54} به ترتیب 0، 13 و 23 میکرون است که نشان دهنده تاثیر غیرقابل چشم‌پوشی سختی میانگین دو ماده بر حرارت ورودی فرایند است. شکل(7) نیز دقیقا بر همین استدلال دلالت دارد. همان‌طور که شکل نشان می‌دهد با افزایش سختی در سمت فولاد ساده کربنی (یعنی همان افزایش درصد کربن)، ضخامت هر دو ناحیه ترمو-مکانیکی و متاثر از حرارت نیز افزایش پیدا کرده است. افزایش حرارت ورودی ناشی از افزایش سختی، به پدیده تبلور مجدد دینامیکی سرعت بخشیده، آن را تشدید می‌کند و همچنین ماند

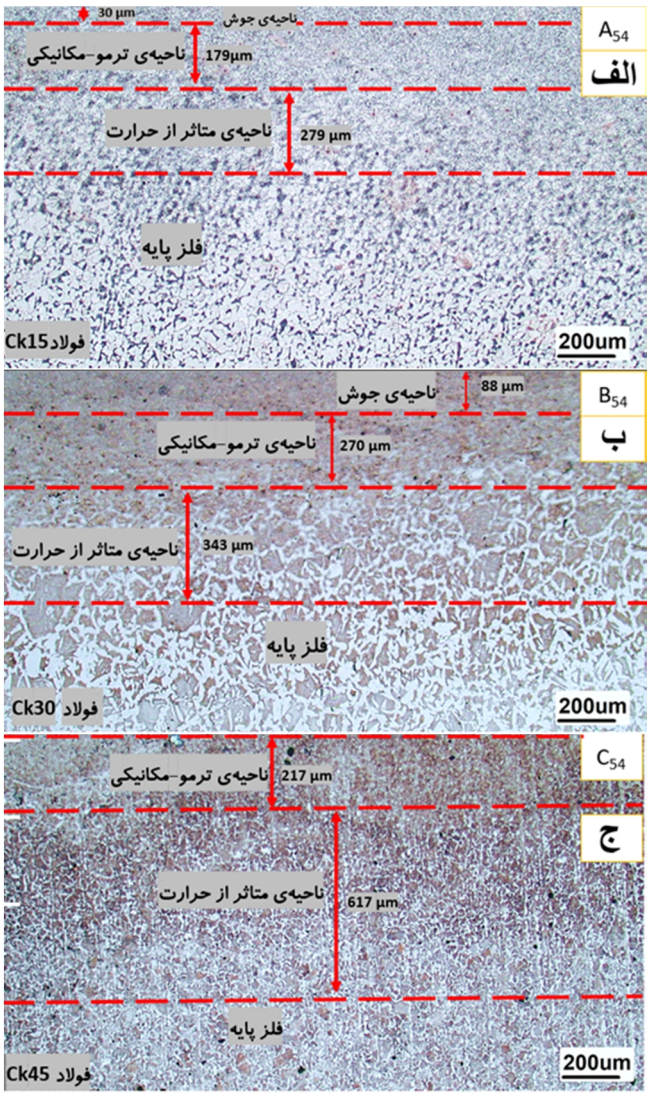
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.22]

حرارت در ناحیه متاثر از حرارت را نیز بیشتر کرده سبب افزایش ضخامت آن می‌شود [20, 21].



شکل6- تصاویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار ناحیهٔ جوش سه نمونه الف- A_{54}، ب- B_{54} و ج- C_{54} در سمت ساده کربنی.

به منظور بررسی تاثیر افزایش فشار فورج بر ریزساختار مقطع جوش اصطکاکی دورانی، دو نمونهٔ C_{54} و C_{58} به عنوان نمونه‌های شاهد انتخاب شدند. شکل‌های (8و9) به ترتیب تصاویر ریزساختاری مربوط به نواحی مختلف جوش دو نمونه را نشان می‌دهد. در شکل (8) دو نکته مهم قابل مشاهده است. اول آنکه، افزایش ضخامت ناحیهٔ فریت پرویوتکتوییدی در نمونهٔ C_{54} به نسبت نمونهٔ C_{58} است که عدد آن به ترتیب 23 و 10 میکرومتر محاسبه شده است (شکل 8). با افزایش فشار فورج از 40 بار به 80 بار، میزان بسیار زیادی از مادهٔ ویسکو پلاستیک حامل حرارت ورودی فرایند از مقطع جوش به صورت زائده بیرون زده و در نتیجه حرارت کمتری برای کمک به ادامه نفوذ اتم‌های کربن باقی می‌ماند و این متفاوت بودن ضخامت ناشی از این مسئله است. نکتهٔ دوم، تفاوت ضخامت ناحیهٔ جوش در دو نمونه است که برای دو نمونهٔ C_{54} و C_{58} به ترتیب 101 و 212 میکرومتر است (شکل 8– الف و 8-ب).



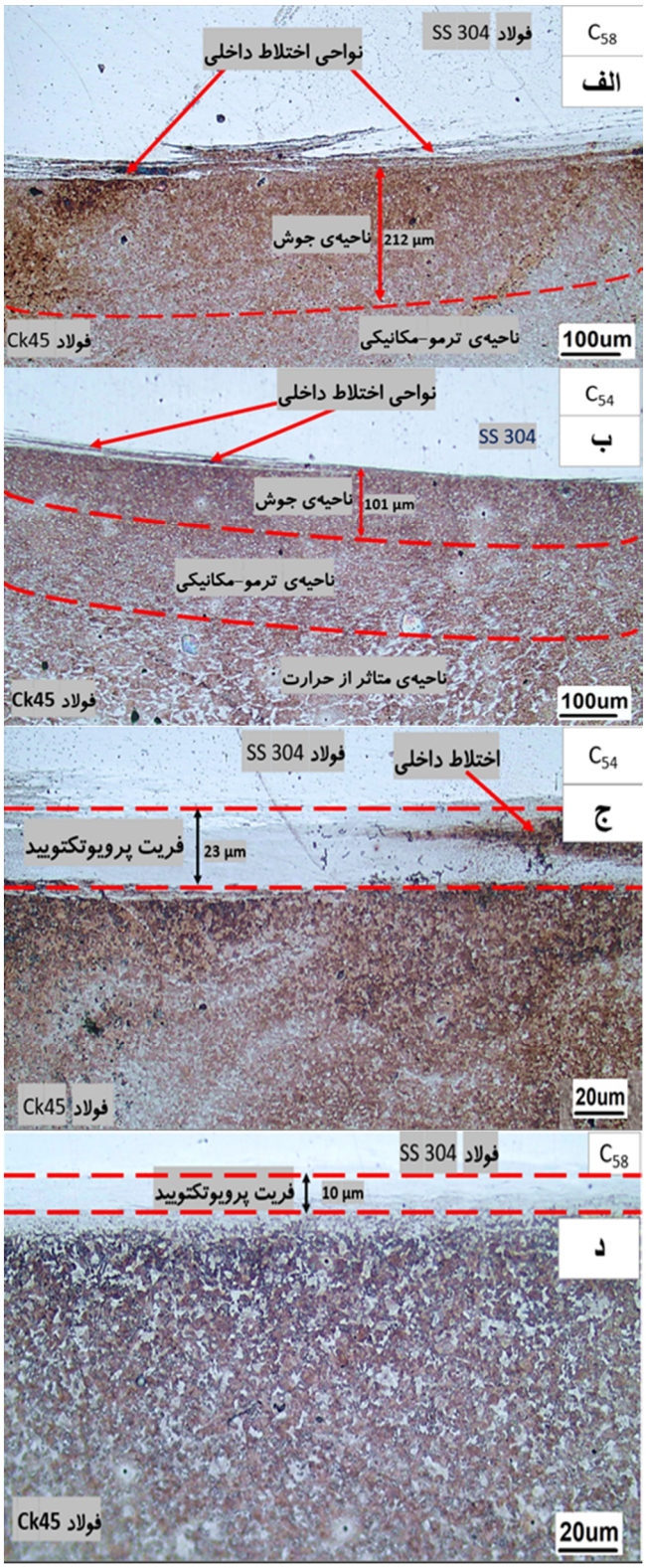
شکل 7- تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار ناحیه‌ی ترمو-مکانیکی و متاثر از حرارت سه نمونه الف- A_{54}، ب- B_{54} و ج- C_{54} در سمت ساده کربنی.

پدیدهٔ تبلور مجدد دینامیکی بسیار به مقدار تنش وارده برای ریزدانه کردن مقطع جوش حساس است. این حساسیت در شکل (6) نیز آشکار است. با افزایش عدد فشار فورج و تشدید تنش وارده بر مقطع جوش، ریزدانگی ناشی از تبلور مجدد در

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.22]

هر دو ناحیه جوش و ترمو- مکانیکی تشدید شده و به همین سبب هم شواهد بر افزایش ضخامت این دو ناحیه در نمونه C_{58} دلالت دارد. شکل (9) ضخامت نواحی ترمو-مکانیکی و متاثر از حرارت را برای دو نمونهٔ C54 و C58 نشان می‌دهد ضخامت ناحیهٔ ترمو مکانیکی برای دو نمونهٔ مذکور به ترتیب 217 و 274 میکرومتر است. علت این تفاوت به توضیحات مرتبط به متفاوت بودن نواحی جوش برمی‌گردد. ضخامت ناحیهٔ متاثر از حرارت برای دو نمونه بالا نیز به ترتیب 617 و 303 میکرومتر است که این اختلاف نیز به خروج شدید ماده ویسکو پلاستیک و اختلاف ماند حرارت مربوط است.

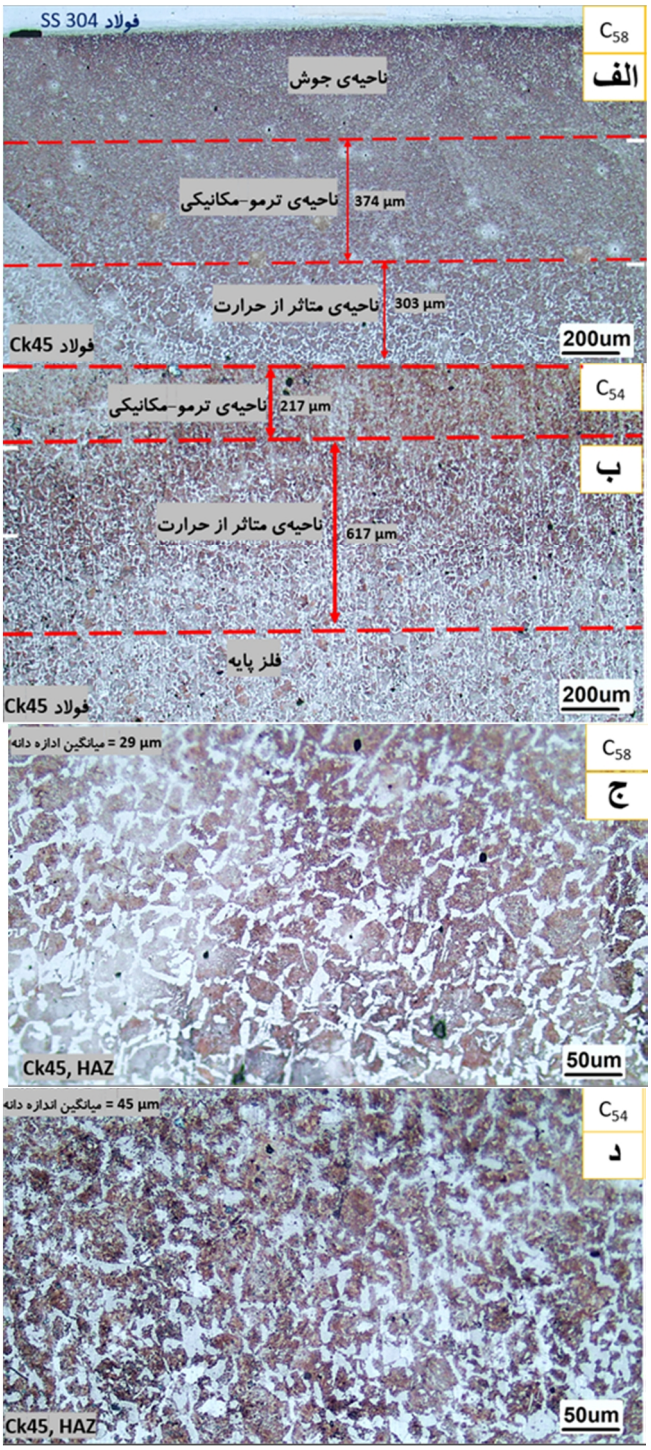
به علت مردود شدن و جوش نخوردن نمونه C_{52}، برای مقایسه تاثیر ریزساختاری کاهش فشار فورج بر مقطع جوش روش جوشکاری اصطکاکی دورانی، دو نمونه B_{54} و B_{52} برای این منظور انتخاب شدند که تصاویر ریزساختاری مربوط به مقطع جوش آن‌ها در شکل (10) آورده شده است. با دقت در شکل (10)، دیده می‌شود که ضخامت نواحی جوش و ترمو-مکانیکی برای دو نمونه B_{54} و B_{52} به ترتیب(88، 270) و (53، 227) میکرومتر است. چرایی کاهش ضخامت این دو ناحیه با کاهش مقدار فشار فورج، به تضعیف شدن پدیده‌ی تبلور مجدد بر می‌گردد چراکه با کم کردن تنش اعمالی به مقطع جوش، از شدت تبلور مجدد در دو ناحیه جوش و ترمو-مکانیکی کاسته شده، ضخامت آن‌ها کاهش پیدا خواهد کرد. شکل (10) همچنین نشان می‌دهد که ضخامت ناحیه‌ی متاثر از حرارت برای دو نمونه B_{54} و B_{52} به ترتیب 345 و 425 میکرومتر است. همان‌طور که پیش‌تر در شکل (3) بیان شد، با کاهش فشار فورج مقادیر بیشتری از ماده ویسکوپلاستیک در مقطع جوش باقی می‌ماند (تشکیل پلیسه کمتر) که در نهایت با انتقال حرارت درون این حجم از ماده ویسکوپلاستیک به سمت فلزات پایه، افزایش ماند حرارت در منطقه متاثر از حرارت تشدید شده و ضخامت این ناحیه را افزایش می‌دهد. به منظور بررسی تاثیر استفاده از فولادهای ساده کربنی متفاوت بر ریزساختار سمت فولاد زنگ‌نزن 304 در حین جوشکاری اصطکاکی دورانی ناهمسان، سمت زنگ‌نزن دو نمونه A_{54} و C_{54} به عنوان ناحیه‌های شاهد انتخاب شدند و تصاویر ریزساختاری آن‌ها در دو بزرگ‌نمایی مختلف در شکل (11) آورده شده است.



شکل 8- تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار ناحیه جوش دو نمونه C_{58} (الف و ج) و C_{54} (ب و د) در سمت ساده کربنی.

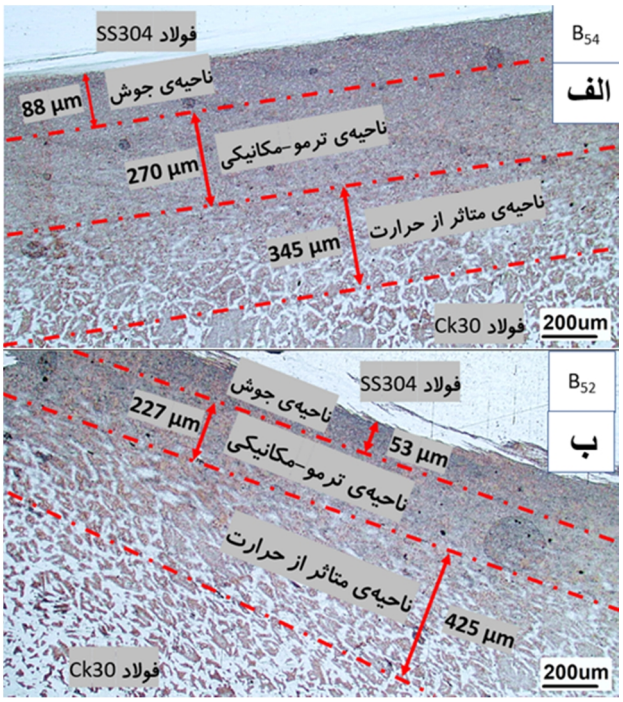
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.22]



شکل9- تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار ناحیه‌ی ترمو-مکانیکی و متاثر از حرارت دو نمونه C_{58} (الف و ج) و C_{54} (ب و د) در سمت ساده کربنی.

به واسطه سختی و سختی گرم بالاتر فولاد Ck45 به نسبت فولاد Ck15، نه تنها میزان حرارت ورودی، بلکه شدت سایش و سیلان مواد در نمونه C_{54} شدیدتر است که باعث افزایش ضخامت هر سه ناحیه متداول جوش در این نمونه است.



شکل 10- تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار کلی منطقه جوش دو نمونه الف- B_{54} و ب- B_{52} در سمت ساده کربنی.

شکل (11) همچنین یک نکته بسیار مهم در جوشکاری اصطکاکی دورانی را نشان می‌دهد که آن ریزدانگی بیشتر ناحیه جوش به نسبت ناحیه ترمو مکانیکی است. پدیدهٔ تبلور مجدد در هر دو ناحیهٔ ترمو-مکانیکی و ناحیهٔ جوش اتفاق می‌افتد اما در ناحیه جوش، علاوه بر تبلور مجدد، پدیدهٔ برش خوردن دانه‌ها ناشی از سیلان شدید سطح مجاور در فصل مشترک نیز رخ می‌دهد که این امر به همراه تبلور مجدد دینامیکی، سبب تشدید ریزدانگی این ناحیه می‌شود [20, 22].

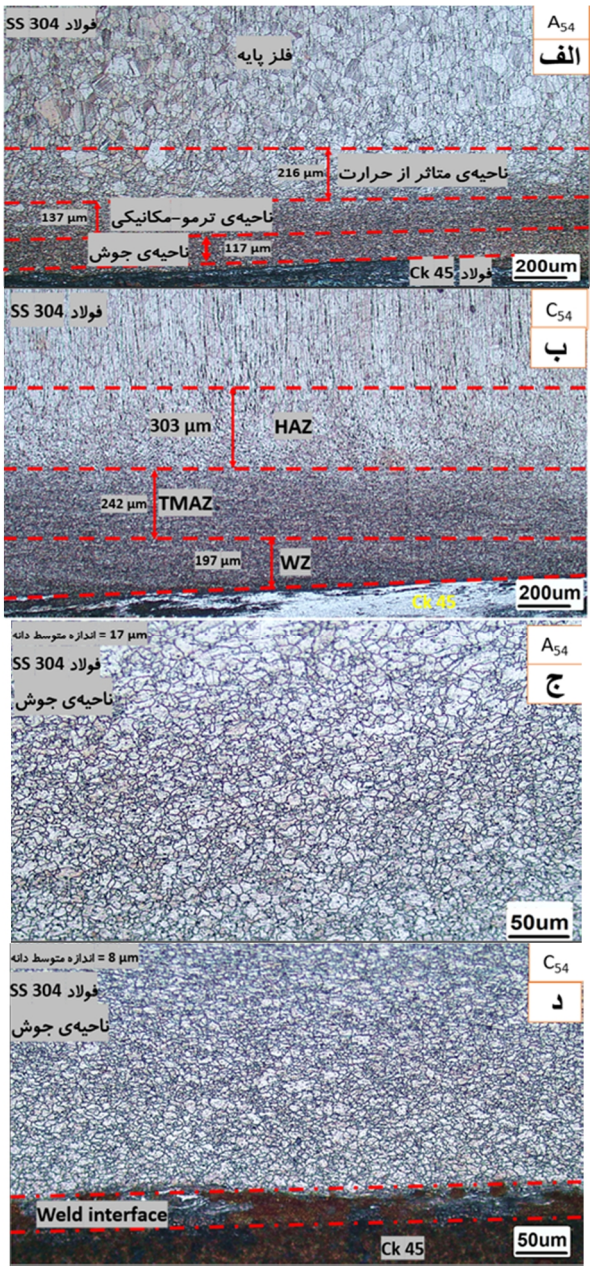
برای ساده‌سازی و درک تاثیر تغییرات فشار فورج در پارامترهای ثابت و فلزهای پایه ثابت بر اندازه دانه، نمونه‌های سری A به عنوان نمونه شاهد انتخاب گردید و نتایج اندازه دانه آن‌ها در جدول(4) نمایش داده شده است.

به منظور بررسی احتمال حضور فازهای مخربی همچون کاربیدهای کروم، آزمایش پراش پرتو ایکس بر روی مستعدترین نمونه‌ها به تشکیل کروم کاربید انجام گرفت که نتایج آن در شکل (12) نشان داده شده است. در این شکل پیک‌های مربوطه به کمک نرم‌افزار Xpert شناسایی شد و نشان داده شد که پیک‌ها مربوط به سه فاز سمنتیت، آستنیت و فریت

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.22]

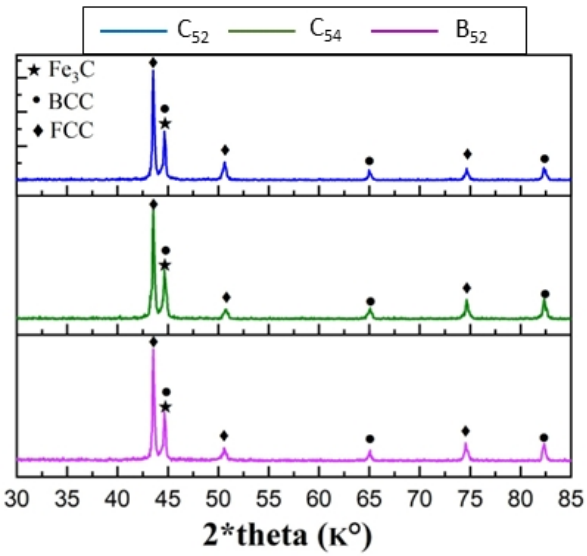
هستند و پیکی مرتبط به کروم کاربید در سه پراش انجام گرفته وجود ندارد. هچنین با مقایسهٔ پراش دو نمونهٔ C_{52} و C_{54} جابجایی پیک مشاهده می‌شود که این امر به دلایل مختلفی اتفاق می‌افتد، از جمله تفاوت تنش پسماند در حین استفاده از دو پارامتر جوشکاری، تفاوت میزان نفوذ کربن در این دو نمونه و تفاوت خطاهای ناشی از دستگاه برای این دو نمونه ایجاد شده است.



شکل 11- تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار منطقه‌ی جوش دو نمونه A_{54} (الف و ج) و C_{54} (ب و د) در سمت فولاد زنگ‌نزن 304 و در دو بزرگ‌نمایی مختلف برای هر دو نمونه.

جدول 4- نتایج اندازه دانه برای نواحی مختلف نمونه‌های سری A.

نام نمونه	ناحیهٔ مدنظر	اندازه میانگین دانه (میکرومتر)
A_{52}	WZ	13
	TMAZ	19
	HAZ	54
A_{54}	WZ	10
	TMAZ	20
	HAZ	56
A_{58}	WZ	7
	TMAZ	15
	HAZ	55



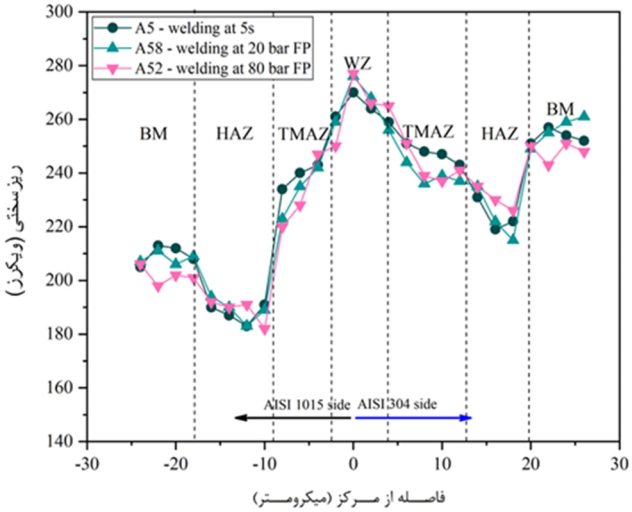
شکل 12- نتایج آزمایش پراش پرتو ایکس نمونهٔ C_{52}، C_{58} و B_{52}.

3-2-سختی‌سنجی

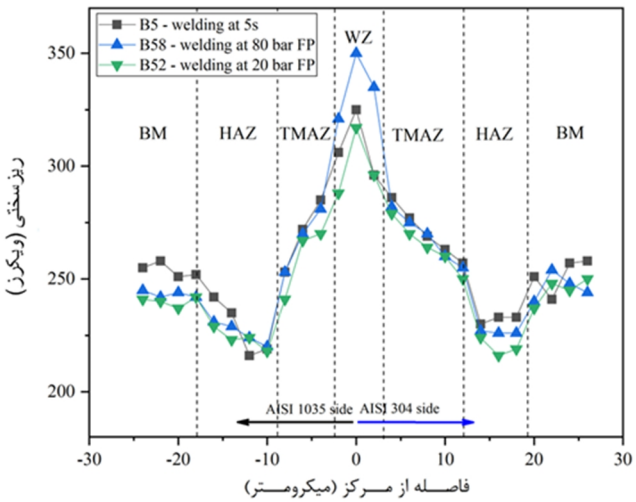
آزمایش ریزسختی سنجی بر روی تمام نمونه‌ها انجام گرفت که نتایج آن در شکل‌های (13، 14 و 15) نشان داده شده است. این سه شکل از سمت فلز پایهٔ فولاد ساده کربنی اندازه‌گیری و رسم شده و با عبور از مقطع جوش، در سمت فولاد زنگ‌نزن 304 به اتمام می‌رسد. در نمودارها با حرکت از سمت فلز پایه به سمت فصل مشترک جوش ابتدا به ناحیهٔ متاثر از حرارت رسیده که به واسطه رشد دانه و ماند حرارتی در فرایند جوشکاری، سختی این ناحیه از فلز پایه کمتر می‌شود و با رسیدن به ناحیهٔ ترمو-مکانیکی، به واسطه‌ی ریزدانگی ناشی از تبلور مجدد دینامیکی،

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.22]

سختی روندی صعودی به خود می‌گیرد و با رسیدن به ناحیه جوش و فصل مشترک، سختی بیشینه می‌شود.

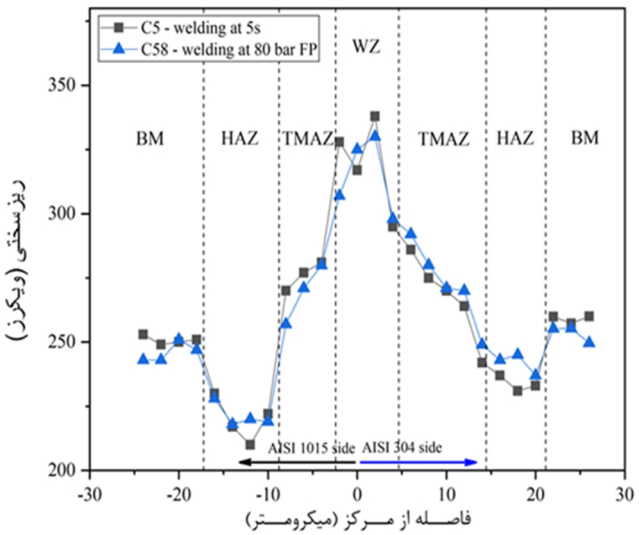


شکل 13- نتایج آزمایش ریزسختی بر روی نمونه‌های سری A.



شکل 14- نتایج آزمایش ریزسختی بر روی نمونه‌های سری B.

با دقت به اشکال و توضیحات مربوط به رابطه‌ی میان فشار فورج و ماند حرارت، مشاهده شد که با افزایش فشار فورج، سختی ناحیهٔ جوش و فصل مشترک جوش افزایش می‌یابد (برای مثال شکل 13). علت این امر به کاهش اثر ماند حرارتی مادهی ویسکوپلاستیک فصل مشترک مرتبط است و در عین حال با افزایش فشار فورج، ریزدانگی ناحیه‌ی جوش شدیدتر نیز می‌شود و سختی افزایش پیدا می‌کند. این روند برای نمونه‌های سری C واقع در شکل (15) صادق نیست. با دقت به توضیحات شکل (6 و 8)، مشخص گردید که در فصل مشترک نمونه C_{54}، یک لایه فریت پرویوتکتوییدی نرم و با ضخامت موثر ایجاد می‌شود که به واسطه به وجود آمدن این ناحیه، سختی نمونه C_{54} در ناحیه جوش افت شدیدی پیدا کرده است.



شکل 15- نتایج آزمایش ریزسختی بر روی نمونه‌های سری C.

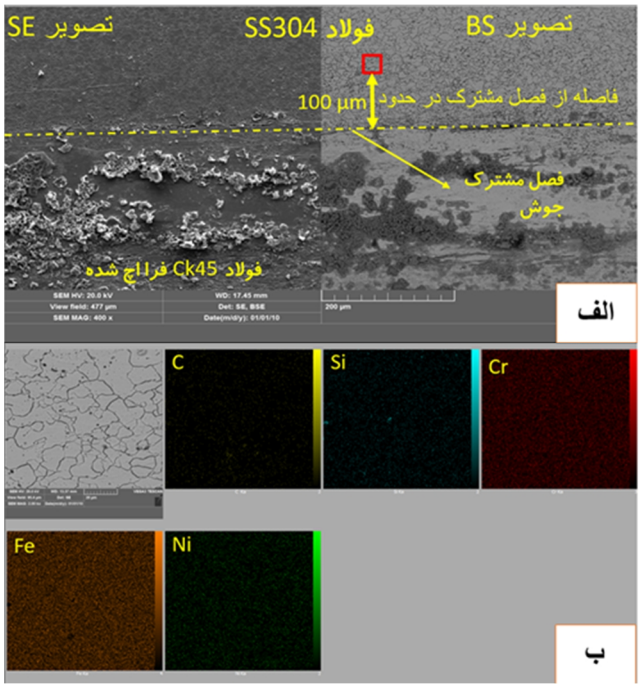
3-3-بررسی ریزساختاری با میکروسکوپ الکترونی

به منظور اندازه‌گیری دقیق اختلاف اندازه دانه نواحی مختلف و همچنین میزان نفوذ کربن به ناحیه فصل مشترک، نمونه بهینه آزمایش کشش (B_{54})، به عنوان نمونه شاهد تحت بررسی با میکروسکوپ الکترونی قرار گرفت که نتایج آن در شکل (16– الف و 16-ب) نشان داده شده است. با توجه به شکل (16)، افزایش تدریجی اندازه دانه با حرکت از سمت فصل مشترک به سمت فلز پایه فولاد زنگ‌نزن 304 نمایان است. اندازه‌گیری‌ها به کمک نرم افزار Image-J نشان داد که اندازه دانه برای سه ناحیه جوش، ترمو-مکانیکی و ناحیه‌ی متاثر از حرارت به ترتیب 6 میکرومتر، 11 میکرومتر و 48 میکرومتر است. همچنین به منظور بررسی میزان نفوذ اتم کربن و احتمال حضور کروم کاربید در ناحیه متاثر از حرارت، از این ناحیه آنالیز عنصری صفحه‌ای انجام گرفت که نتایج آن در شکل (16-ب) آورده شده است. با دقت به شکل، میزان کربن شناسایی شده در این نمونه و در این ناحیه انتخابی، بسیار کم

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.22]

است و پراکندگی عنصر کروم، کاملا یکنواخت و بدون هیچ‌گونه تجمع خاصی گزارش شده که این موارد می‌تواند خود توضیحی برای خواص مکانیکی خوب این نمونه باشد.



شکل 16- نتایج بررسی به کمک میکروسکوپ الکترونی برای نمونه B_{52} به همراه ریزساختار و آنالیز عنصری صفحه‌ای ناحیه‌ی جوش (مربع قرمز رنگ).

4-نتیجه‌گیری

در مطالعهٔ حاضر، به بررسی اثر فشار فورج و درصد کربن فولاد ساده کربنی بر جوشکاری اصطکاکی دورانی ناهمسان فولاد زنگ‌نزن 304 به انواع فولاد ساده کربنی پرداخته شد. نتایج پژوهش به شرح زیر است:

-مقدار بهینهٔ فشار فورج برای دست‌یابی به بهترین خواص مکانیکی مقدار 40 بار است. کاهش یا افزایش این مقدار بهینه، تاثیر مستقیم روی رفتار و سیلان ماده‌ی ویسکوپلاستیک فصل مشترک جوش داشته و سبب می‌شود که خواص کششی مقطع جوش افت داشته باشد.

-پارامترهای بهینه برای جوشکاری ناهمسان فولاد کربن متوسط به فولاد زنگ‌نزن 304، فشار اصطکاک 40 بار، فشار فورج 40 بار، زمان اصطکاک 5 ثانیه و سرعت چرخشی 1500 دور بر دقیقه است. در این پارامترهای بهینه، فولاد ساده کربنی CK30 بهترین خواص کششی را با استحکام نهایی 715 مگاپاسکال و بازدهی جوش 116 درصد از خود نشان داد. علت افت خواص کششی در فولادهای ۱۰۱۵AISI و ۱۰۴۵AISI به ترتیب به نرمی بیش از اندازه و تشکیل لایه فریت پرویوتکتوییدی در مقطع جوش برمی‌گردد.

-به کمک آنالیز عنصری خطی و آزمایش پراش پرتوی ایکس انجام گرفته بر روی مستعدترین نمونه‌ها به تشکیل کروم کاربید، نشانه‌ای از حضور کروم کاربید در مقطع جوش پیدا نشد.

-نتایج سختی‌سنجی نشان داد که با افزایش فشار فورج در جوشکاری اصطکاکی دورانی ناهمسان فولاد ساده کربنی به فولاد زنگ‌نزن 304، سختی فصل مشترک جوش فارغ از جنس فولاد افزایش می‌یابد به غیر از فولاد ۴۵Ck که به واسطه تشکیل فریت پرویوتکتویید با ضخامت قابل توجه در ناحیه جوش، شاهد افت شدید سختی هستیم.

-نشان داده شد که درصد کربن موجود در فولاد ساده کربنی، به واسطه‌ی تغییر دادن درصد پرلیت زمینه و عدد سختی، تاثیر به‌سزایی بر حرارت ورودی و همچنین شدت و میزان سیلان مواد دارد به نحوی که فولادهای زنگ‌نزن 304 جوشکاری شده با فولاد ۴۵Ck، ناحیه جوش و ناحیه متاثر از حرارت ضخیم‌تری به نسبت دو فولاد ۳۰Ck و ۱۵Ck دارند.

منابع

1-M. Farbakhti, S. R. Elmi Hosseini, S. A. Mousavi Mohammadi, S. Sadatabhari, H. Yuan-ming, and R. Li, "Similar and dissimilar rotary friction welding of steels: A review of microstructural evolution and mechanical properties," Journal of Materials Research and Technology, vol. 36, pp. 8777-8803, 2025/05/01/ 2025, doi: https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.05.079.

2-F. Ahmad Mir, N. Zaman Khan, A. Noor Siddiquee, and S. Parvez, "Friction based solid state welding – A review," Materials Today: Proceedings, vol. 62, pp. 55-62, 2022/01/01/ 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.457.

3-R. M. Davison, T. R. Laurin, J. D. Redmond, H. Watanabe, and M. Semchyshen, "A review of worldwide developments in stainless steels," Materials & Design, vol. 7, no. 3, pp. 111-119, 1986/05/01/ 1986, doi: https://doi.org/10.1016/0261-3069(86)90001-4.

4-S. Dutta, "Different Types and New Applications of Stainless Steel," vol. 62, pp. 86-91, 10/15 2018.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.22]

and Stainless Steel Joints," Journal of Manufacturing and Materials Processing, vol. 7, no. 1, doi: 10.3390/jmmp7010007.
15-R. Paventhan, P. R. Lakshminarayanan, and V. Balasubramanian, "Optimization of Friction Welding Process Parameters for Joining Carbon Steel and Stainless Steel," Journal of Iron and Steel Research, International, vol. 19, no. 1, pp. 66-71, 2012/01/01/ 2012, doi: https://doi.org/10.1016/S1006-706X(12)60049-1.
16-J. A. James and R. Sudhish, "Study on Effect of Interlayer in Friction Welding for Dissimilar Steels: SS 304 and AISI 1040," Procedia Technology, vol. 25, pp. 1191-1198, 2016/01/01/ 2016, doi: https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.08.238.
17-H. Ma, G. Qin, P. Geng, F. Li, B. Fu, and X. Meng, "Microstructure characterization and properties of carbon steel to stainless steel dissimilar metal joint made by friction welding," Materials & Design, vol. 86, pp. 587-597, 2015/12/05/ 2015, doi: https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.07.068.
18-A. E. Salas Reyes, G. Á. Lara Rodriguez, J. R. González Parra, and V. H. Mercado Lemus, "Microstructural Characterization and Corrosion Behavior of Similar and Dissimilar Welded Advanced High-Strength Steels (AHSS) by Rotary Friction Welding," Materials, vol. 17, no. 4, doi: 10.3390/ma17040918.
19-S. Khamar, V. Vyas, P. Tamakuwala, and V. J. Badheka, "Mechanical and Metallurgical Analysis of Rotary Friction Welded Low Carbon Steel and Stainless Steel," in Advances in Manufacturing Engineering, Singapore, M. K. Dikshit, N. Khanna, A. Soni, and A. P. Markopoulos, Eds., 2024// 2024: Springer Nature Singapore, pp. 203-214.
20-K. Huang and R. E. Logé, "A review of dynamic recrystallization phenomena in metallic materials," Materials & Design, vol. 111, pp. 548-574, 2016/12/05/ 2016, doi: https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.09.012.
21-Y. Su et al., "Recrystallization behavior and strengthening mechanism of friction stir welded T-joint of Ti80 titanium alloy," Materials Characterization, vol. 216, p. 114257, 2024/10/01/ 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.matchar.2024.114257.
22-A. S. Chaves, M. M. da Silva Reis, I. G. C. de Jesus, R. C. S. Santos, and S. Griza, "Study of Rotary Friction Welding as an Alternative to Resistance Welding in High-Carbon Steel Wires: Effects on Fatigue and Hydrogen Embrittlement," Journal of Failure Analysis and Prevention, 2026/05/20 2026, doi: 10.1007/s11668-026-02455-0.
5-K. Siva Prasad, C. S. Rao, and D. Rao, "A Review on Welding of AISI 304L Austenitic Stainless Steel," Journal for Manufacturing Science and Production, vol. 14, pp. 1-11, 01/30 2014, doi: 10.1515/jmsp-2012-0007.
6-S. Ho-Jun, A. Dong-Gu, I. Kie-Gon, S. Byung-Heon, and Y. Young-Tae, "Dissimilar Metal Welding of Medium Carbon Steel and Austenitic Stainless Steel utilize CW Nd:YAG Laser," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, vol. 23, 01/01 2006.
7-S. Murugan, S. K. Rai, P. V. Kumar, T. Jayakumar, B. Raj, and M. S. C. Bose, "Temperature distribution and residual stresses due to multipass welding in type 304 stainless steel and low carbon steel weld pads," International Journal of Pressure Vessels and Piping, vol. 78, no. 4, pp. 307-317, 2001/04/01/ 2001, doi: https://doi.org/10.1016/S0308-0161(01)00047-3.
8-P. Li, J. Li, l. Xun, J. Xiong, F. Zhang, and L. Liang, "A study of the mechanisms involved in initial friction process of continuous drive friction welding," Journal of Adhesion Science and Technology, vol. 29, 03/09 2015, doi: 10.1080/01694243.2015.1022499.
9-T. Lu, W. li, C. Wang, and D. Tian, Friction welding of 42CrMo medium carbon steel and 36Mn2V alloy steel: Effects of forging pressure and post-weld heat treatment on microstructure and mechanical properties. 2024.
10-M. R. Shokrzadeh, F. Nateghi-Alahi, M. R. Mansoori, and P. Javadi, "The improvement of the threaded-based mechanical splice by modifying the threaded system: Study of techniques cold rolling and rotating friction welding," Journal of Building Engineering, vol. 80, p. 107964, 2023/12/01/ 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107964.
11-B. Lei, Q. Shi, L. Yang, C. Liu, J. Pan, and G. Chen, "Evolution of interfacial contact during low pressure rotary friction welding: A finite element analysis," Journal of Manufacturing Processes, vol. 56, pp. 643-655, 2020/08/01/ 2020, doi: 10.1016/j.jmapro.2020.05.034.
12-S. Murugan and P. Sathiya, "A Review of Friction Welding Research Addressing the Influence, Development, Similar & Dissimilar Welding," Annals of Dunarea de Jos University of Galati Fascicle XII Welding Equipment and Technology, vol. 34, pp. 65-88, 12/31 2023, doi: 10.35219/awet.2023.07.
13-D. Ananthapadmanaban, V. Rao, N. Abraham, and P. Kalvala, "A study of mechanical properties of friction welded mild steel to stainless steel joints," Materials & Design, vol. 30, pp. 2642-2646, 08/01 2009, doi: 10.1016/j.matdes.2008.10.030.
14-H. Firmanto, S. Candra, M. A. Hadiyat, Y. P. Triastomo, and I. Wirawan, "Tensile Strength and Microstructure of Rotary Friction-Welded Carbon Steel

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.22]