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

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

Volume 9, Number 1, 2023

Crack prevention by adjusting aluminum concentration in GTAW cladded $Al_xCoCrFeNi$ high entropy alloy

N. Abbasian Vardin, T. Saeid*, A. R. Akbari
Faculty of Materials Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran.

Received 7 February 2023 ; Accepted 20 May 2023

Abstract

In this study, gas-tungsten arc welding was used for the cladding of two high entropy alloys of AlCoCrFeNi (Al_1) and $Al_{0.7}$CoCrFeNi ($Al_{0.7}$) onto plain carbon steel plates. The welding process was carried out at a welding current of 180 A and a welding speed of 1.4 mm/s. The microstructures, craking behavior, phase composition, and hardness of the clads were characterized using various methods, such as optical microscopy (OM), field emission scanning electron microscopy (FESEM), X-ray diffractometry (XRD) analysis, and microhardness measurements. The results indicated that the Al_1 clad had a petal-like structure of the BCC and Cr-rich phases. Both intergranular and transgranular cracks were identified in the Al_1 alloy, which were recognized to be solidification cracks. Thermal stress and brittleness of the BCC phase promote cracking of the Al_1. On the other hand, in the $Al_{0.7}$ alloy, in addition to the BCC phase, a new FCC phase was formed with various Widmanstatten and dendritic morphologies in the clad microstructure and the Cr-rich phase was not observed. Furthermore, in this alloy with lower Al content, a crack-free clad was obtained. The crack prevention in the $Al_{0.7}$ alloy was attributed to a combination of factors, including a decrease in the solidification range, formation of the FCC phase, and reduction in hardness.

Keywords: High entropy alloy, Cladding, Gas tungsten arc welding,Solidification cracking.

*Corresponding Author: saeid@sut.ac.ir

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.11]

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

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران

jwsti.iut.ac.ir

سال نهم، شماره1، بهار و تابستان 1402

جلوگیری از تشکیل ترک با تنظیم مقدار آلومینیم در آلیاژ آنتروپی بالای $Al_xCoCrFeNi$ روکش‌دهی شده با فرایند GTAW

نیما عباسیان وردین، توحید سعید*، علیرضا اکبری

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران.

دریافت مقاله: 1401/11/18 ؛ پذیرش مقاله: 1402/02/30

چکیده

در پژوهش حاضر دو آلیاژ آنتروپی بالای $Al_1CoCrFeNi$ (Al_1) و $Al_{0.7}CoCrFeNi$ ($Al_{0.7}$) با فرایند جوشکاری قوسی تنگستن با گاز محافظ آرگون در شدت جریان جوشکاری 180 A و سرعت جوشکاری 1/4 mm/s بر روی فولاد ساده کربنی روکش‌دهی شد. برای مطالعه ریزساختار و شناسایی نوع ترک‌ها هم‌چنین ترکیب فازی و سختی روکش‌ها از میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ الکترون روبشی نشر میدانی، پراش‌سنجی اشعه ایکس و ریزسختی سنجی استفاده شد. نتایج نشان داد که روکش Al_1 دارای ساختار گلبرگی متشکل از فاز BCC همراه با فاز غنی از Cr بر روی مرزدانه‌ها است. در آلیاژ $Al_{0.7}$ با مقدار Al کمتر، فاز غنی از Cr حذف شده و بجای آن فاز جدید با شبکه کریستالی FCC در انواع ویدمن اشتاتن و دندریتی تشکیل می‌شود. در آلیاژ Al_1 هر دو نوع ترک‌های مرزدانه‌ای و درون‌دانه‌ای ایجاد شده از نوع ترک انجمادی تشخیص داده شدند. هم‌چنین تنش‌های حرارتی و ترد بودن فاز BCC به عنوان عوامل افزایش حساسیت به ترک تعیین شد. در آلیاژ $Al_{0.7}$ ترکیبی از عواملی نظیر کاهش دامنه انجماد، تشکیل فاز FCC در مورفولوژی دندریتی و کاهش سختی در نتیجه کاهش مقدار Al، به عنوان عوامل حذف ترک در آلیاژ شناسایی شد.

کلمات کلیدی: آلیاژ آنتروپی بالا، روکش‌دهی، جوشکاری قوسی تنگستن با گاز محافظ، ترک انجمادی.

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

1- مقدمه

در صنایع حساس نظیر هوافضا، پتروشیمی و انرژی نیاز به موادی است که ترکیب مناسبی از خواص مکانیکی و خوردگی در شرایط خاص، نظیر دماهای بالا و محیط‌های خورنده داشته باشد [1]. سوپر آلیاژها یکی از اصلی‌ترین آلیاژهایی هستند که بیشترین کاربرد را در دماهای بالا و محیط‌های خورنده نظیر جوش‌آورها، لوله‌های حامل مواد خورنده و فلنج‌ها دارند [2و 3]. محدودیت اصلی سوپر آلیاژها، هزینه زیاد تولید آن‌ها است که یکی از علت‌های آن بالا بودن قیمت عناصر پایه نظیر Ni و Co است. روکش‌دهی آلیاژهای ارزان قیمت با سوپر آلیاژها، یکی از بهترین راهکارها برای کاهش هزینه تولید محسوب می‌شود زیرا مقدار مصرف سوپرآلیاژ در قطعه صنعتی کاهش می‌یابد. از این رو، روکش‌دهی مواد با سوپر آلیاژهای پایه نیکل یکی از بهترین گزینه‌ها برای افزایش عمر قطعات

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.11]

نظیر جوش‌آورها محسوب می‌شود. باوجود روکش‌دهی سوپر آلیاژها، همچنان هزینه تمام شده تولید به دلیل وجود عناصر گران‌بها نظیر Mo،Nb، Ti و V بسیار زیاد است [4, 5].

در سال 2004 آلیاژهای نوینی به نام آلیاژهای آنتروپی بالا معرفی شدند که برخی از این آلیاژها قابلیت جایگزین شدن بجای سوپر آلیاژها را دارند [6, 7]. آلیاژهای آنتروپی بالا بر خلاف آلیاژهای متداول نظیر (آلیاژهای آلومینیم، تیتانیم و فولاد)، دارای چندین عنصر اصلی هستند. آلیاژهای آنتروپی بالا به دلیل داشتن ویژگی‌های خاص نظیر سختی، مقاومت به خوردگی و اکسایش می‌توانند در صنایع هوا فضا و انرژی کاربرد وسیعی داشته باشند [8]. همچنین در نتیجه افزایش تعداد عناصر اصلی در آلیاژهای آنتروپی بالا، چهار ویژگی که به اثرات هسته معروف هستند در این آلیاژها ایجاد شده بطوری‌که این ویژگی‌ها باعث منحصر بفرد شدن این آلیاژها نسبت به آلیاژهای متداول می‌شود. از طرفی آلیاژهای آنتروپی بالا نیز شبیه سوپر آلیاژها هزینه تولید زیادی دارند اما با تمهیدات خاص می‌توان هزینه تولید این آلیاژها را کاهش داد. روش اول، روکش‌دهی این آلیاژها است [9]. در تولید قطعات صنعتی، روکش‌دهی با روش جوشکاری به دلیل سرعت تولید بالا، هزینه تولید پایین و ضخامت بالای روکش‌های تولید شده بسیار مورد توجه است. در بین انواع فرایندهای جوشکاری ذوبی و حالت جامد، فرایند جوشکاری قوسی گاز به دلیل کیفیت روکش بالا و هزینه تجهیزات نسبتاً ارزان یکی از پرکاربردترین فرایندهای روکش‌دهی محسوب می‌شود. از این فرایند برای روکش‌دهی لوله جوش‌آورها، فلنج‌ها، مخازن تحت فشار و لوله‌های حامل مواد خورنده استفاده می‌شود [10]. روش دوم کاهش هزینه تولید، طراحی آلیاژ با ترکیب شیمیایی مناسب است. تا به امروز بیش از 400 نوع آلیاژ آنتروپی بالا طراحی و مورد مطالعه قرار گرفته است [11]. از بین انواع آلیاژهای آنتروپی بالا، آلیاژ بر پایه AlCoCrFeNi به دلیل هزینه تولید کمتر نسبت به آلیاژهای آنتروپی بالای دیگر و دارا بودن خواص منحصر به فرد، مورد توجه بسیاری از پژوهشگران است. مزیت اول این آلیاژ، مقاومت به اکسایش و خوردگی مطلوب در دماهای بالا است [12-15]. نتایج برخی تحقیقات نشانگر این است که این آلیاژ مقاومت به خوردگی و اکسایش بهتری نسبت به برخی از سوپرآلیاژها نظیر اینکونل 724 و 825 دارند [15و 16]. ثانیاً در مقایسه با سوپر آلیاژهای پایه نیکل هزینه تولید کمتری دارد، زیرا مقدار عناصر گران‌بها نظیر Ni و Co در این آلیاژها کمتر است. پس آلیاژ AlCoCrFeNi از لحاظ هزینه و خواص می‌تواند جایگزین مناسب سوپر آلیاژها در برخی تجهیزات شود.

از طرفی یکی از عیوب این آلیاژ AlCoCrFeNi تشکیل ترک در حین جوشکاری است. ترک یکی از عیوب اصلی در جوشکاری محسوب می‌شود که بعد از شناسایی نوع آن و با در نظر گرفتن تمهیدات خاص می‌توان از بروز آن جلوگیری کرد [17, 18]. تا به حال تعداد محدودی پژوهش در مورد تشکیل ترک و علت آن در آلیاژ بر پایه $Al_xCoCrFeNi$ تدوین شده است. فوکسینگ و همکاران [19] آلیاژ $Al_xCoCrFeMnNi$ (2، 1/5، 1، 0/5 و x=0) با روش جوشکاری پلاسمایی بر روی فولاد ساده کربنی روکش‌دهی کردند. هیچ ترکی در روکش‌ها (1/5، 1، 0/5 و x=0) شناسایی نشد و تنها در نمونه با مقدار آلومینیم x=2 تشکیل ترک‌هایی در سطح روکش و ناحیه متاثر از حرارت گزارش کردند. محققین افزایش اعوجاج شدید شبکه، افزایش سختی و کاهش انعطاف‌پذیری در اثر افزایش آلومینیم را به عنوان عوامل تشکیل ترک ارائه کردند. فن و همکاران [20] نیز در روکش‌های AlCoCrFeNi تولید شده با فرایند جوشکاری قوسی گاز تنگستن در حرارت ورودی مختلف تشکیل ترک‌های گرم را گزارش کرده‌اند اما نتایجی در مورد نوع ترک و علت تشکیل آن ارائه نشده است. در مطالعات قبلی [21] با روکش‌دهی آلیاژ با AlCoCrFeNi بر روی فولاد ساده کربنی تشکیل ترک بر سطح و مقطع عرضی روکش شناسایی شده است اما نوع و علت تشکیل ترک مورد بررسی قرار نگرفته است. در پژوهش دیگری [22] با کاهش Al، آلیاژ $Al_{0.7}CoCrFeNi$ بر روی فولاد ساده کربنی با شرایط جوشکاری مشابه روکش‌دهی شد و هیچ ترکی در سطح و مقطع عرضی روکش شناسایی نشد.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.11]

خلاصه نتایج تحقیقات قبلی نشانگر این است که با کاهش Al ترک‌ها در آلیاژ حذف می‌شود اما نوع ترک‌های ایجاد شده در آلیاژ AlCoCrFeNi و علت حذف ترک در آلیاژ $Al_{0.7}$CoCrFeNi تا کنون مورد بررسی قرار نگرفته است. لذا در پژوهش حاضر هدف اول شناسایی نوع ترک‌های ایجاد شده در روکش آلیاژ Al_1CoCrFeNi است و هدف دوم، پی بردن به علل حذف ترک در آلیاژ $Al_{0.7}$CoCrFeNi است.

2- مواد و روش پژوهش

برای ایجاد روکش در این پژوهش از فرایند جوشکاری قوسی گاز- تنگستن همراه با فلز پرکننده در حالت تسمه پودری استفاده شد که در شکل(1) طرح‌واره مراحل بصورت گام‌به‌گام نشان داده شده است. در مرحله اول براساس نوع ترکیب شیمیایی آلیاژ آنتروپی بالا، مقدار درصد اتمی و سپس درصد وزنی عناصر برای دو آلیاژ AlCoCrFeNi و $Al_{0.7}$CoCrFeNi محاسبه و سپس براساس نوع آلیاژ مقدار هر عنصر توسط ترازوی آزمایشگاهی با حد تفکیک 0/01 g توزین شد. اشاره به این نکته مهم است که برای ساخت تسمه‌ها از پودر آهن استفاده نشد و مقدار آهن آلیاژ از طریق مقدار نفوذ جوش به فلزپایه (رقت) تامین شد. در ادامه برای خلاصه‌نویسی، روکش‌های AlCoCrFeNi و $Al_{0.7}$CoCrFeNi به ترتیب به صورت Al_1 و $Al_{0.7}$ نشان داده خواهد شد. در مرحله دوم پودر عناصر به یک ظرف عایق‌بندی شده حاوی گاز آرگون انتقال داده شدند و به مدت 30 دقیقه در دستگاه همزن، برای توزیع یکنواخت مخلوط شدند. در مرحله سوم پودرها توسط قالب فولادی و پرس هیدرولیک 10 تن با اعمال فشار 20 MPa در همدیگر فشرده شده و تسمه‌های پودری در اندازه 2/5×10×55 میلی‌متر تهیه شد.

در مرحله چهارم تسمه‌های پودری برای روکش‌دهی بر روی فلزپایه St 37 قرار داده شد و از دستگاه اینورتر جوشکاری شرکت گام الکتریک با مدل PSQ250AC/DC برای روکش‌دهی استفاده شد. جوشکاری مطابق با شرایط ذکر شده در جدول (1) صورت گرفت. قبل از روکش‌دهی تسمه‌های فولادی فلزپایه در ابتدا در اندازه 12×40×80 میلی‌متر توسط اره نواری برش‌داده شدند. در ادامه سنباده‌زنی از شماره60 تا 400 و برس‌زنی برای اکسیدزدایی سطح انجام شد. سپس از استون صنعتی برای تمیزکاری آلودگی‌ها و روغن سطح فلز پایه استفاده شد. برای مطالعه ریزساختار و ترکیب فازی روکش‌های آنتروپی بالا به ترتیب از میکروسکوپ نوری PMG3 Olympus، میکروسکوپ الکترون روبشی نشر میدانی مدل Mira 3 Tescan، دستگاه پراش سنجی اشعه ایکس مدل Bruker Advanced D8 استفاده شد. الگوهای XRD با استفاده از لامپ (آند) مسی ($K_{\alpha1}$=0/154 nm) تحت ولتاژ 40 kV و جریان 40 mA ثبت شد.

نمونه‌های لازم برای متالوگرافی با میکروسکوپ های نوری و الکترون روبشی بعد از برش عرضی، سنباده‌زنی و صیقل‌کاری، توسط محلول aqua (HCl/HNO_3=3/1) حکاکی شدند. سختی پوشش‌ها بر اساس استاندارد ASTM E384 توسط دستگاه ریزسختی سنجی Germanischer glloyd با نیروی 300 gf با زمان اعمال بار 15 s از سطح مقطع نمونه‌ها اندازه‌گیری شد.

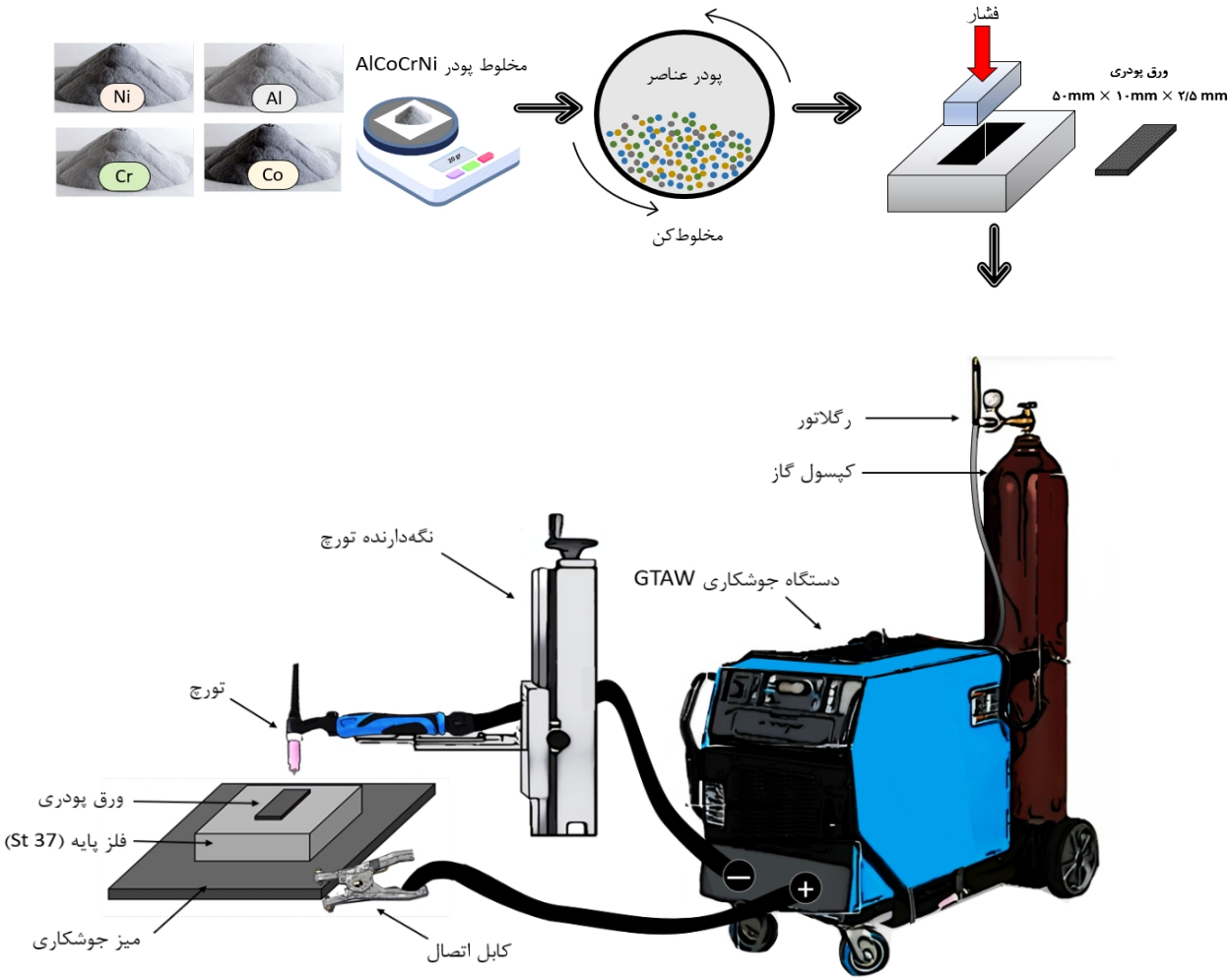
3- نتایج و بحث

شکل (2) نمای ظاهری روکش‌های تولید شده را بر روی فولاد ساده کربنی نشان می‌دهد. طبق شکل در روکش Al_1 دو عیب ترک (پیکان قرمز) و تخلخل (پیکان زرد) تشکیل شده در حالیکه در روکش $Al_{0.7}$ فقط عیب تخلخل وجود دارد. بر اساس نتایج بازرسی چشمی، ترک‌ها بصورت عرضی به تعداد چهار عدد در روکش Al_1 ایجاد شده است. براساس مشاهدات در حین جوشکاری، ترک‌ها در حین سرمایش در دمای بالا تشکیل شدند که این نشانه احتمال اینکه ترک‌ها از نوع گرم هستند را افزایش می‌دهد [23].

شکل(3) الگوی پراش اشعه ایکس روکش‌ها را نشان می‌دهد. طبق شکل در روکش Al_1 تنها پیک‌های مربوط به فازهای B2 و A2 با شبکه کریستالی BCC تشکیل شده ولی در روکش $Al_{0.7}$ پیک‌های فاز با شبکه کریستالی FCC در کنار فازهای A2 و B2 نیز ایجاد شده است.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.11]



شکل 1- طرحواره مراحل مختلف آماده‌سازی تسمه‌های پودری برای روکش‌دهی با فرایند GTAW.

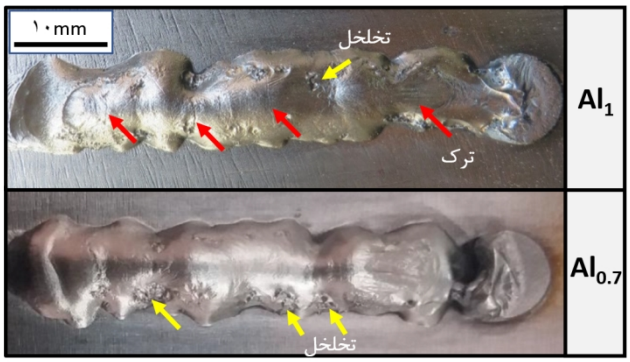
طبق نتایج محققین دیگر، Al در آلیاژ $Al_xCoCrFeNi$ یک عنصر پایدارکننده فاز BCC بوده و در نتیجه کاهش Al پایداری فاز FCC افزایش یافته است [24, 25]. لازم به اشاره است که فازهای B2 و A2 در این آلیاژ دارای شبکه کریستالی یکسان BCC هستند و تنها از لحاظ نظم کریستالی با یکدیگر متفاوتند بطوریکه دو فاز B2 و A2 به ترتیب دارای شبکه کریستالی منظم و نامنظم هستند. همچنین به دلیل نزدیک بودن پارامتر شبکه این دوفاز به یکدیگر، پیک‌های با شدت بیشینه آنها بر همدیگر منطبق شده و امکان تفکیک آنها از همدیگر در الگوهای پراش اشعه ایکس بسیار سخت است.

شکل (4) تصاویر OM دو روکش آلیاژ Al_1 و $Al_{0.7}$ را نشان می‌دهد. طبق شکل در آلیاژ Al_1 ، ساختار گلبرگی از تفکیک دانه‌ها به دو ناحیه دندریتی روشن و بین‌دندریتی تیره تشکیل شده که ساختار متداول این آلیاژ در حالت ریختگی است [24].

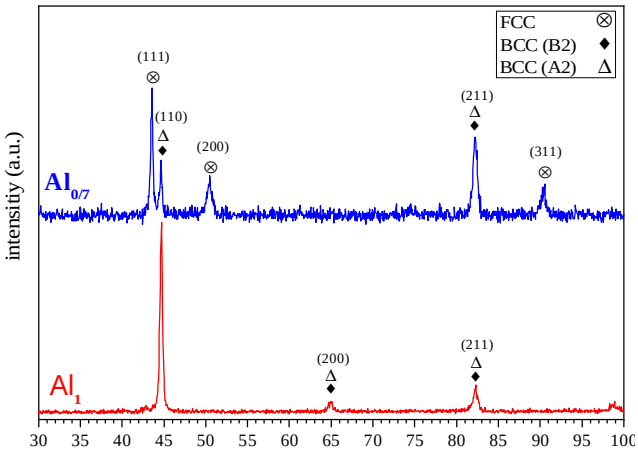
جدول1- متغیرها و شرایط جوشکاری در پژوهش حاضر.

متغیر جوشکاری	نوع یا مقدار	متغیر جوشکاری	نوع یا مقدار
قطبیت	DCEN	گاز محافظ	آرگون (Ar)
جنس الکترود	W-2%ThO_2	دبی گاز محافظ (L/min)	10
قطر الکترود (mm)	3	شدت جریان جوشکاری (A)	180
زاویه نوک الکترود (درجه)	60	سرعت جوشکاری (mm/s)	1/4

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.11]



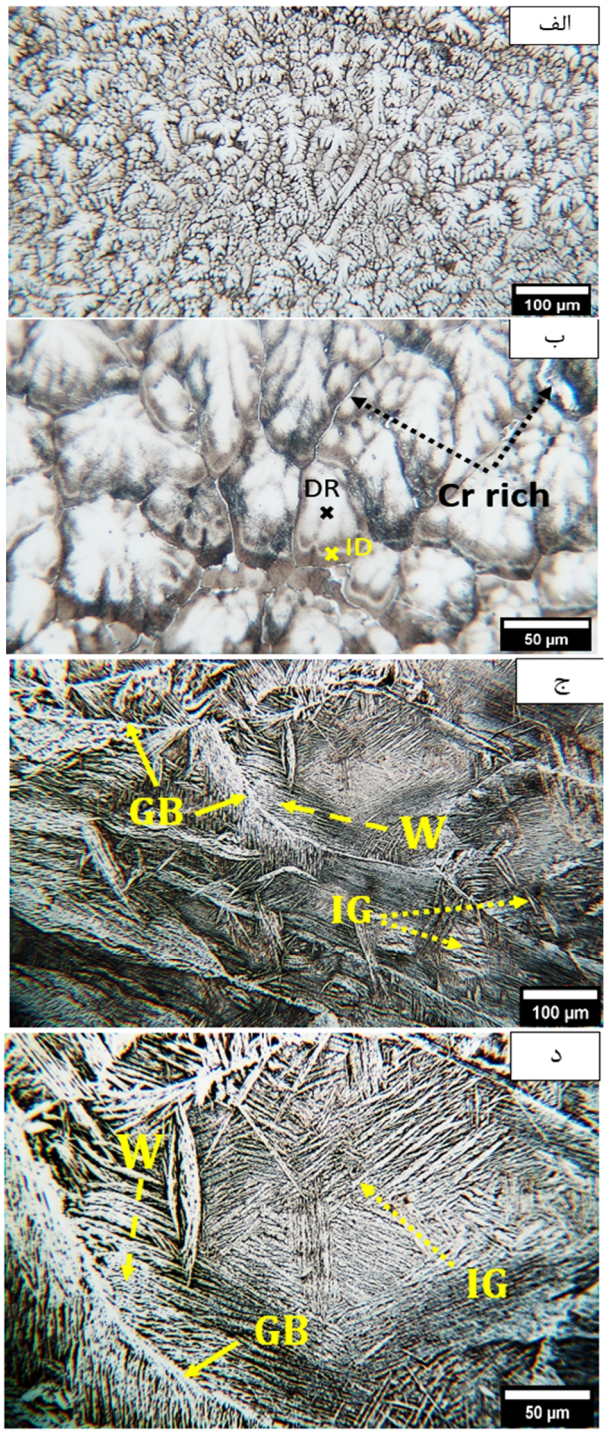
شکل2- نمای ظاهری روکش‌های آلیاژ Al_1 و $Al_{0.7}$. (پیکان قرمز: ترک و پیکان زرد: تخلخل).



شکل3- الگوی پراش اشعه ایکس روکش‌های آلیاژ Al_1 و $Al_{0.7}$.

همچنین فازی نواری شکل بر روی مرزدانه با طول و ضخامت‌های متفاوت ایجاد شده است. براساس نتایج تحقیقات قبلی از این روکش، ناحیه دندریتی و بین‌دندریتی دارای شبکه کریستالی BCC بوده و به ترتیب عناصر Al-Ni و Cr-Fe در این دو ناحیه جدایش پیدا کرده است [21]. طبق تصاویر میکروسکوپ الکترون روبشی نشر میدانی از تحقیقات قبلی، رسوب‌های A2 با مورفولوژی‌های مختلف بر روی فاز زمینه B2 در این نواحی تشکیل شده است. همچنین فاز نواری طبق آنالیز عنصری غنی از Cr است.

در مقابل در روکش آلیاژ $Al_{0.7}$ دو فاز تیره و روشن تشکیل شده است. طبق نتایج تحقیقات قبلی این آلیاژ [22]، نواحی تیره و روشن به ترتیب فاز BCC و FCC است. همچنین فاز FCC در انواع مورفولوژی‌های مرزدانه‌ای، درون دانه‌ای (IG) و ویدمن اشتاتن (W) تشکیل شده است. از نظر ریزساختاری روکش $Al_{0.7}$ با مقدار Al کمتر در مقایسه با روکش Al_1 دارای دو تفاوت عمده است. اول اینکه به همراه فاز BCC فاز FCC در انواع مورفولوژی‌ها تشکیل شده است و دوم اینکه بجای فاز غنی از Cr، فاز FCC بر روی مرزدانه‌ها تشکیل شده است.

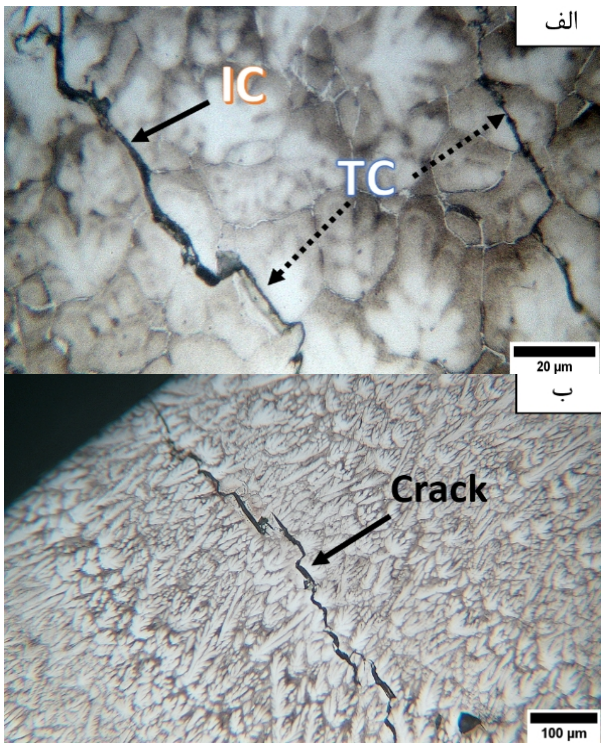


شکل4- تصاویر میکروسکوپی نوری از ریزساختار روکش آلیاژ: (الف، ب) Al_1 و (ج، د) $Al_{0.7}$.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]

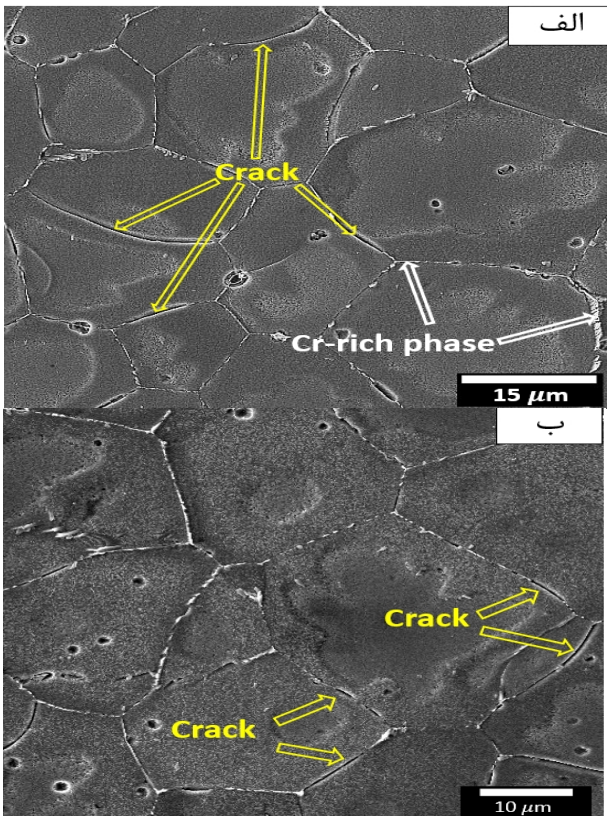
[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.11]

شکل (5) تصاویر میکروسکوپ نوری از تشکیل ترک را در سطح مقطع عرضی روکش Al_1 نشان می‌دهد. طبق شکل ترک‌ها در دو نوع بین دانه‌ای و درون‌دانه‌ای ایجاد شده بطوری‌که ترک از نوع بین‌دانه‌ای از لحاظ طول غالب‌تر است. تشکیل ترک در دو نوع بین دانه‌ای و درون‌دانه‌ای باعث دشوارتر شدن شناسایی نوع ترک می‌شود پس برای شناسایی دقیق نیاز به نتایج آزمون‌های دیگر است.



شکل5- تصاویر میکروسکوپی نوری از تشکیل ترک‌ها در روکش آلیاژ Al_1.

شکل(6) تصاویر میکروسکوپ الکترون روبشی نشر میدانی از تشکیل ترک‌های بین‌دانه‌ای را در روکش آلیاژ Al_1 نشان می‌دهد. طبق شکل، ترک‌ها بصورت پراکنده در بخش‌های مختلف مرزدانه ایجاد شده است. تشکیل ترک در این حالت شباهت بسیاری به نوع ترک انجمادی دارند. این نوع ترک در مرحله انتهایی انجماد، زمانی‌که دمای مذاب به دمای خط جامد نزدیک است، غالباً به صورت بین‌دانه‌ای در ناحیه خمیری تشکیل می‌شود [23]. تئوری‌های مختلفی برای تشکیل این نوع ترک ارائه شده است ولی سازوکار دقیق آن بصورت کامل مشخص نیست با این حال در تمامی تئوری‌ها، تشکیل لایه نازک مذاب در مرحله انتهایی انجماد، عامل اصلی تشکیل این ترک گزارش شده است [26]. سازوکار تشکیل ترک انجمادی بدین گونه است که با انجماد مذاب باقیمانده در مجاورت مرزدانه، تنش‌های کششی به دانه‌های منجمد شده اعمال می‌شود و اگر مقدار تنش‌ها بیشتر از استحکام کششی جوش باشد، ترک انجمادی تشکیل و توسط عوامل مختلف نظیر تنش‌های حرارتی اشاعه می‌یابد. از اصلی‌ترین عوامل افزایش حساسیت به تشکیل ترک انجمادی، وجود دامنه انجمادی وسیع در آلیاژ است. طبق نمودارهای فازی آلیاژ Al_1 که توسط محققین بسیاری شبیه‌سازی و رسم شده است [25]، این آلیاژ دارای دامنه انجماد وسیع بوده و حساس به ترک انجمادی است.

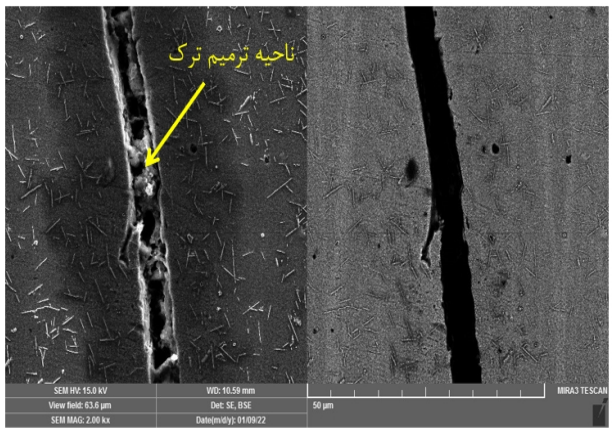


شکل6- تصاویر FESEM از تشکیل ترک‌ها بصورت بین‌دانه‌ای در آلیاژ Al_1.

شکل (7) تصویر میکروسکوپ الکترون روبشی نشر میدانی از ترک بین دانه‌ای تشکیل شده را در روکش Al_1 نشان می‌دهد. طبق شکل، ذراتی در داخل ترک بصورت غیر پیوسته وجود دارد. بر اساس تئوری‌های ارائه شده در خصوص ترک انجمادی در حین تشکیل ترک، مذاب اطراف آن می‌تواند به عنوان عامل

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.11]

ترمیم‌کننده ترک عمل کند. اگر مقدار مذاب برای پرکردن ترک کافی باشد، ترک ترمیم خواهد شد و در صورت ناکافی بودن مقدار مذاب، ترک بطور کامل ترمیم نشده و مذاب به صورت غیرپیوسته در داخل ترک منجمد می‌شود. طبق شکل، می توان حضور ذرات در داخل ترک را نشانه‌ای از ترک انجمادی در نظر گرفت [26].

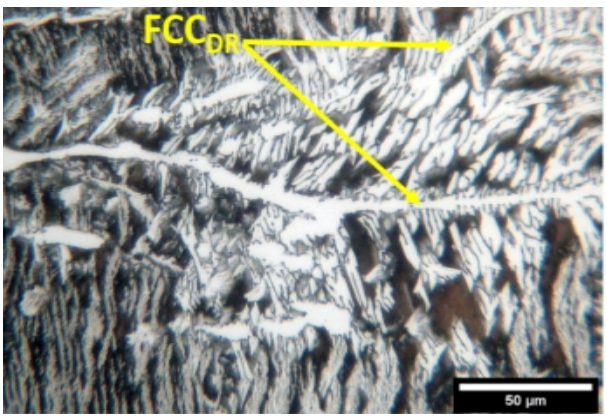


شکل7- تصویر FESEM از ترک بین‌دانه‌ای روکش Al_1 و وجود نشانه‌هایی از ناحیه ترمیم ترک در آن.

در نهایت به دلیل این که ترک‌ها در دمای بالا تشکیل شده و وجود نشانه‌هایی نظیر وسیع بودن دامنه انجمادی، تشکیل ترک بر روی مرزدانه بصورت پراکنده و ترمیم آن توسط مذاب، ترک‌ها از نوع انجمادی شناسایی شد. لازم به اشاره است که امکان رخ دادن ترک انجمادی بصورت درون‌دانه‌ای نیز در شرایطی که ساختار حساس باشد وجود دارد، مخصوصا در شرایطی که تنش‌های حرارتی زیاد باشد. طبق نتایج الگوی پراش اشعه ایکس، روکش Al_1 دارای فاز BCC (B2) است و این فاز به دلیل دشوار بودن حرکت نابجایی‌ها یک فاز تردی بوده و حساس به ترک انجمادی است بطوری‌که در این شرایط تنش‌های حرارتی می‌تواند باعث اشاعه ترک انجمادی شود. معمولا ترک‌های حاصل از تنش‌های حرارتی بصورت درون‌دانه‌ای اشاعه می‌یابند. در حالت کلی روند تشکیل ترک به احتمال زیاد بدین صورت است که در ابتدا ترک‌های انجمادی در ناحیه خمیری تشکیل می‌شود. سپس با کاهش دما از دمای خط جامد، اشاعه ترک به دلیل ترد بودن فاز B2 زمینه و به دلیل وجود تنش‌های حرارتی ترک‌ها بصورت درون دانه‌ای اشاعه می‌یابد.

حال سوالی که مطرح می‌شود این است که علت حذف ترک در آلیاژ $Al_{0.7}$ چیست؟ طبق نمودار فازی برای آلیاژ $Al_xCoCrFeNi$ مشخص است که با کاهش ضریب Al از 1 به 0/7 دامنه انجماد به دلیل نزدیک‌تر شدن به دمای یوتکتیک کاهش می‌یابد. همانطور که اشاره شد دامنه انجماد وسیع، احتمال رخ دادن ترک انجمادی را افزایش می‌دهد پس با کاهش Al، حساسیت به ترک انجمادی در آلیاژ $Al_{0.7}$ کمتر می‌شود [23, 26].

از سوی دیگر، تغییر نوع استحاله فازی در آلیاژ $Al_{0.7}$ نسبت به Al_1 نیز می‌تواند بر تشکیل ترک تاثیرگذار باشد. شکل(8) تصاویر میکروسکوپ نوری از تشکیل فاز FCC در مورفولوژی دندریتی را بر روی برخی مرزدانه‌ها و داخل دانه روکش $Al_{0.7}$ نشان می‌دهد. تشکیل بازوهای اولیه در فاز FCC نشانگر این است که این مورفولوژی مستقیماً از مذاب استحاله یافته است. به عبارتی دیگر مورفولوژی دندریتی در نتیجه استحاله حالت جامد از فاز BCC تشکیل نشده است. طبق نمودار فازی برای این آلیاژ، امکان تشکیل فاز FCC از مذاب در مثلث یوتکتیک L+BCC+FCC وجود دارد.



شکل8- تصاویر میکروسکوپی نوری از ریزساختار روکش آلیاژ $Al_{0.7}$، تشکیل فاز FCC در مورفولوژی دندریتی.

تشکیل فاز FCC دندریتی در ناحیه خمیری به دو علت می‌تواند باعث کاهش حساسیت به ترک انجمادی در آلیاژ $Al_{0.7}$ شود. علت اول این است که فاز FCC دندریتی از تشکیل فاز غنی از Cr بر روی مرزدانه‌ها جلوگیری می‌کند. فاز غنی از Cr به

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.11]

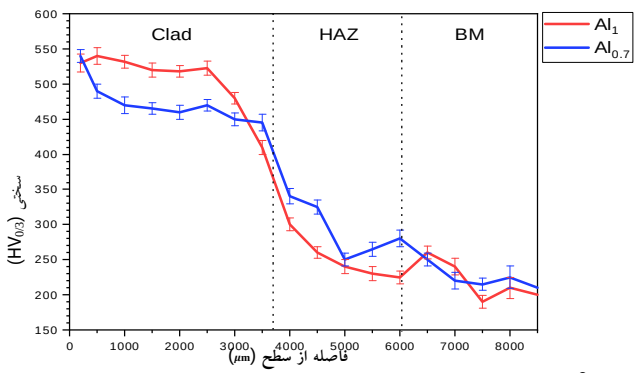
احتمال بسیار به دلیل داشتن Cr زیاد، یک فاز تردی بوده و حضور آن بر روی مرزدانه‌ها در مجاورت ترک انجمادی، باعث اشاعه سریع ترک می‌شود. طبق نتایج آنالیز عنصری در پژوهش قبلی [21, 22]، فاز FCC غنی از FeCrCo بوده و با تشکیل آن در مذاب، مقدار Cr مذاب کاهش می‌یابد. طبق نتایج محققین [27]، فاز غنی از Cr در حین رشد فاز B2 به دلیل جدایش شدید Cr در مذاب، بر روی مرزدانه‌ها تشکیل می‌شود. پس در نتیجه فقیر شدن مذاب به دلیل استحاله فاز FCC دندریتی، احتمال تشکیل فاز غنی از Cr شدیداً کاهش می‌یابد. همچنین فاز FCC طبق نتایج محققین دیگر، دارای انعطاف‌پذیری زیادی بوده و حضور آن بر روی مرزدانه شبیه یک سد عمل کرده و از اشاعه ترک‌ها جلوگیری می‌کند. قاسم‌علی و همکاران [28] سازوکار جوانه‌زنی و رشد ترک را در آلیاژ AlCoCrFeNi عملیات حرارتی شده در 1273 °C با انجام آزمون کشش بررسی کردند. آنها انشعاب و توقف ترک را با رسیدن به فاز FCC در مرزدانه مشاهده کردند.

در ضمن عوامل دیگری نیز بر حساسیت به ترک در آلیاژ Al_1 تاثیرگذار است. شکل (9) پروفیل سختی دو روکش Al_1 و $Al_{0.7}$ را نشان می‌دهد. همچنین میانگین سختی روکش‌های آلیاژ Al_1 و $Al_{0.7}$ به ترتیب برابر 506 و 473 HV تعیین شد. طبق این نتایج می‌توان استنباط کرد که آلیاژ Al_1 به دلیل سختی زیاد، تردتر بوده و انعطاف‌پذیری کمتری نسبت به آلیاژ $Al_{0.7}$ دارد. با کاهش انعطاف‌پذیری آلیاژ، احتمال تشکیل ترک انجمادی افزایش می‌یابد زیرا تحت تنش‌های کششی ایجاد شده بین دانه‌ها در فاز ترد ترک آسان‌تر تشکیل شده و اشاعه می‌یابد [26]. در نهایت در آلیاژ $Al_{0.7}$ ترکیبی از عوامل کاهش دامنه انجماد، تشکیل فاز FCC دندریتی بجای فاز غنی از Cr و کاهش سختی نسبت به آلیاژ Al_1 به دلیل کاهش Al، باعث کاهش حساسیت به ترک‌خوردگی و عدم تشکیل ترک شده است.

4- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر دو روکش آلیاژ آنتروپی بالای AlCoCrFeNi (Al_1) و $Al_{0.7}$CoCrFeNi ($Al_{0.7}$) بر روی فولاد ساده کربنی با فرایند جوشکاری قوسی تنگستن با گاز محافظ آرگون در شدت‌جریان جوشکاری 180 A و سرعت جوشکاری 1/4 mm/s روکش‌دهی شد و علت تشکیل ترک و حذف آن براساس جزئیات ریزساختاری و ویژگی‌های انجمادی دو آلیاژ مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج مهم حاصل از پژوهش حاضر را می‌توان بصورت زیر خلاصه نمود:

- ریزساختار روکش Al_1 دارای مورفولوژی گلبرگی متشکل از فاز BCC همراه با فاز غنی از Cr بر روی مرزدانه‌ها است. بعد از روکش‌دهی ترک‌های عرضی بر روی سطح روکش آلیاژ Al_1 ترک‌های بین‌دانه‌ای و درون‌دانه‌ای تشکیل می‌شود.
- به دلیل تشکیل ترک در دمای بالا در حین سرمایش و وجود نشانه‌هایی نظیر دامنه انجماد وسیع و تشکیل ترک بصورت پراکنده بر روی مرزدانه و ترمیم آن توسط مذاب باقیمانده، ترک‌ها از نوع انجمادی شناسایی شدند. همچنین تنش‌های حرارتی و ترد بودن فاز BCC به عنوان عوامل افزایش حساسیت به ترک تعیین شدند.
- در آلیاژ $Al_{0.7}$ بجای فاز غنی از Cr فاز جدیدی با شبکه کریستالی FCC در انواع مورفولوژی‌های مرزدانه‌ای، بین دانه‌ای، ویدمن اشتاتن و دندریتی در داخل دانه و مرزدانه تشکیل می‌شود. با این حال هیچ ترکی در سطح و مقطع عرضی روکش $Al_{0.7}$ شناسایی نشد.
- کاهش دامنه انجماد در آلیاژ $Al_{0.7}$ نسبت به آلیاژ Al_1 به عنوان عامل اصلی حذف ترک در این آلیاژ تشخیص داده شد. همچنین تشکیل فاز FCC در مورفولوژی دندریتی و سختی پایین به علت دارا بودن مقادیر Al کمتر از عوامل دیگر کاهش حساسیت به ترک انجمادی تعیین شد.



شکل9- تغییرات سختی از سطح به عمق در روکش‌های Al_1 و $Al_{0.7}$.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.11]

منابع

1- رسولی. ا و رفیعی. م، " ارزیابی خواص اتصال غیر مشابه فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI316 به فولاد زنگ‌نزن فریتی AISI430 جوشکاری شده توسط فرایند GTAW" نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال 4، شماره2، ص ص 126-111، زمستان 1397.

2- ذاکری. م.ه، نصر اصفهانی.ع و برکت. س.م، "روکش کاری لیزری اینکونل 625 بر روی فولاد A575"، نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال 7، شماره103،2-112، زمستان1400.

3-Donachie, M. J., & Donachie, S. J, "*Superalloys: a technical guide*," ASM international, 2002.

4-Cantor, B., Chang, I. T. H., Knight, P., & Vincent, A. J. B, "Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 375, pp. 213-218, 2004.

5-عمادی. م، مستعان. ح و رفیعی. م، "ارزیابی ریزساختار و رفتار خوردگی اتصالات غیرمشابه لیزری سوپر آلیاژ پایه نیکل 625 به فولاد زنگ‌نزن فریتیAISI430" نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال 5، شماره2، 103-121، زمستان 1398.

6-Tian, F., Wang, Y., Irving, D. L., & Vitos, L, "High-Entropy Alloys: Fundamentals and Applications," 2016.

7-Li, J., Huang, Y., Meng, X., & Xie, Y, "A review on high entropy alloys coatings: fabrication processes and property assessment," *Advanced Engineering Materials*, vol. 21, no. 8, p. 1900343, 2019.

8-Badheka, V. J., Gadakh, V. S., Shinde, V. B., & Bhati, G, "GTAW Application for Additive Manufacturing and Cladding of Steel Alloys," in *Handbook of Smart Materials, Technologies, and Devices: Applications of Industry 4.0*: Springer, 2021, pp. 1-21.

9-Mishra, R. S., Haridas, R. S., & Agrawal, P, "High entropy alloys–Tunability of deformation mechanisms through integration of compositional and microstructural domains," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 812, p. 141085, 2021.

10-Gopinath, V. M., & Arulvel, S, "A review on the steels, alloys/high entropy alloys, composites and coatings used in high temperature wear applications," *Materials Today: Proceedings*, vol. 43, pp. 817-823, 2021.

11-Geng, Y., Tan, H., Cheng, J., Chen, J., Sun, Q., Zhu, S., & Yang, J., "Microstructure, mechanical and vacuum high temperature tribological properties of AlCoCrFeNi high entropy alloy based solid-lubricating composites," *Tribology International*, vol. 151, p. 106444, 2020.

12-Wei, C. B., Du, X. H., Lu, Y. P., Jiang, H., Li, T. J., & Wang, T. M, "Novel as-cast AlCrFe2Ni2Ti05 high-entropy alloy with excellent mechanical properties," *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, vol. 27, no. 10, pp. 1312-1317, 2020.

13-Zhu, J., Lu, S., Jin, Y., Xu, L., Xu, X., Yin, C., & Jia, Y., "High-Temperature Oxidation Behaviours of AlCoCrFeNi High-Entropy Alloy at 1073–1273 K," *Oxidation of Metals*, vol. 94, no. 3, pp. 265-281, 2020.

14-Garg, M., Grewal, H. S., Sharma, R. K., & Arora, H. S, "Enhanced oxidation resistance of ultrafine-grain microstructure AlCoCrFeNi high entropy alloy," *ACS omega*, vol. 7, no. 15, pp. 12589-12600, 2022.

15- کرباسیان. م، ادب‌آوازه. ن و نیکبخت. م، "ارایه مدل ارزیابی ریسک ترک فلزجوش با تکنیک FBWM "، نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال 7، شماره150،2-139، زمستان 1400.

16-Ye, F., Jiao, Z., Yan, S., Guo, L., Feng, L., & Yu, J, "Microbeam plasma arc remanufacturing: Effects of Al on microstructure, wear resistance, corrosion resistance and high temperature oxidation resistance of AlxCoCrFeMnNi high-entropy alloy cladding layer," *Vacuum*, vol. 174, p. 109178, 2020.

17-Fan, Q., Chen, C., Fan, C., Liu, Z., Cai, X., Lin, S., & Yang, C, "AlCoCrFeNi high-entropy alloy coatings prepared by gas tungsten arc cladding: Microstructure, mechanical and corrosion properties," *Intermetallics*, vol. 138, p. 107337, 2021.

18- اسدی. س، سعید. ت، والانژاد ع و خلیل علافی. ج "جوشکاری لیزر غیرهم‌جنس سیم‌های ارتودنسی آلیاژ حافظه‌دار NiTi به فولادزنگ‌نزن آستنیتی"نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال 5، شماره2، 135-146، زمستان 1398.

19-عباسیان. ن، سعید. ت و اکبری. ا، " ریزساختار روکش آنتروپی بالای Al0.7CoCrFeNi حاصل از جوشکاری قوسی تنگستن با گاز محافظ (GTAW)"، دومین کنفرانس بین المللی کاربرد مواد و ساخت پیشرفته در صنایع، تیرماه 1401.

20-Kou, S, "Welding metallurgy," *New Jersey, USA*, vol. 431, no. 446, pp. 223-225, 2003.

21-Wang, W. R., Wang, W. L., Wang, S. C., Tsai, Y. C., Lai, C. H., & Yeh, J. W, "Effects of Al addition on the microstructure and mechanical property of AlxCoCrFeNi high-entropy alloys," *Intermetallics*, vol. 26, pp. 44-51, 2012.

22-Wang, W. R., Wang, W. L., & Yeh, J. W, "Phases, microstructure and mechanical properties of AlxCoCrFeNi high-entropy alloys at elevated temperatures," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 589, pp. 143-152, 2014.

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

24-Murty, B. S., Yeh, J. W., Ranganathan, S., & Bhattacharjee, P. P, *High-entropy alloys*. Elsevier, 2019.

25-Ghassemali, E., Sonkusare, R., Biswas, K., & Gurao, N. P, "In-situ study of crack initiation and propagation in a dual phase AlCoCrFeNi high entropy alloy," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 710, pp. 539-546, 2017.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.11]