

## مروری بر اتصال آلیاژهای با آنتروپی بالا با استفاده از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

**چکیده:** آلیاژهای با آنتروپی بالا نسل جدیدی از آلیاژها هستند که در ساختار آنها برخلاف آلیاژهای متداول، حداقل پنج عنصر با درصدهای مساوی یا نزدیک به هم یافت می شود. به دلیل نوظهور بودن این دسته از آلیاژها و از طرفی با توجه به پیچیدگی و تفاوت گسترده رفتار این آلیاژها با آلیاژهای متداول، جوشکاری آنها دارای پیچیدگی های منحصر به فردی است. روش های جوشکاری متفاوتی هم از روش های ذوبی و هم از روش های حالت جامد برای اتصال این آلیاژها مورد استفاده قرار گرفته است. برخی از پرکاربردترین روش ها، جوشکاری قوس تنگستن با گاز محافظ، جوشکاری لیزر و جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی است. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی یک فرآیند اتصال حالت جامد است که به دلیل حالت جامد بودن بسیاری از عیوب جوشکاری ذوبی را ندارد. در مقاله حاضر به جمع بندی مطالعات صورت گرفته در حوزه اتصال اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای با آنتروپی بالا و مقایسه آن با سایر روش های جوشکاری پرداخته شده است. همچنین پردازش اصطکاکی اغتشاشی این دسته از مواد و همچنین کاربرد این مواد به عنوان روکش یا ذرات تقویت کننده نیز با توجه به مقالات منتشر شده در نشریات معتبر داخلی و خارجی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

**واژه های راهنما:** آلیاژهای با آنتروپی بالا، جوشکاری حالت جامد، جوشکاری ذوبی، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، خواص مکانیکی، ساختار مواد

هادی صفی ولیلو  
دانشجوی کارشناسی

**موسی ساجد\***

استادیار،  
دانشکده فنی و مهندسی،  
دانشگاه شهید مدنی آذربایجان،  
تبریز

مقاله مروری

دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۰۶

بازنگری: ۱۴۰۳/۰۵/۳۱

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۲۷

Hadi Safi Valilu  
BSc Student

**Moosa Sajed\***

Assistant Professor,  
Department of Mechanical  
Engineering  
Azarbaijan Shahid Madani  
University, Tabriz

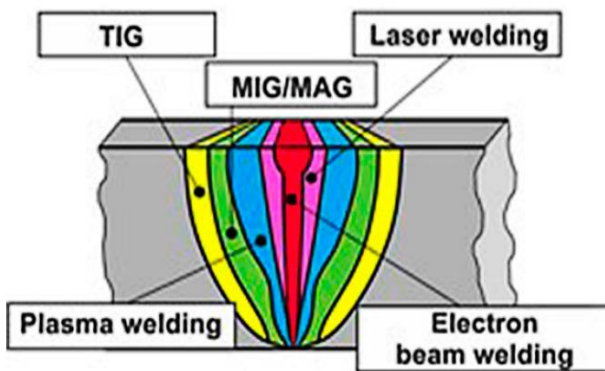
## A review on the application of friction stir welding in the welding of high entropy alloys

**Abstract:** High-entropy alloys (HEAs) are a new generation of alloys that, unlike conventional alloys, contain at least five elements with equal or close percentages. Due to the emerging nature of this category of alloys and on the other hand due to the complexity and wide difference in the behavior of these alloys with conventional alloys, their welding has unique complications. Different welding methods, both fusion and solid state methods, have been used to join these alloys. Some of the most widely used methods are gas tungsten arc welding (GTAW), laser welding, and friction stir welding. Friction stir welding is a solid state joining process that does not have many of the defects of fusion welding due to its solid state nature. In this article, the studies conducted in the field of friction stir welding of high entropy alloys and its comparison with other welding methods have been summarized. Also, the friction stir processing of this class of materials as well as the use of these materials as coatings or reinforcing particles have also been evaluated according to the articles published in academic journals.

**Keywords:** High entropy alloys, Friction stir welding, Solid-state welding, Fusion welding, Mechanical properties, Material structure

## ۱- مقدمه

الکتریکی فلزی یا جوشکاری قوس پلازما و تا ۱۰۷ تا ۱۰۸ وات بر سانتی متر مربع برای جوشکاری لیزری یا پرتو الکترونی متغیر است. مناطق ساختاری تشکیل شده که در شکل (۱) نشان داده شده است، پس از فرآیندهای مختلف جوشکاری می‌توانند از نظر هندسه، اندازه، ریزساختار و ترکیبات به‌طور قابل توجهی متفاوت باشند که به عوامل بسیاری مانند رفتار مواد (عناصر، تبخیر، ذوب، جریان، تغییرات فاز، خنک‌سازی و غیره)، ساختارهای اصلی قطعه کار، اندازه نمونه و پارامترهای جوشکاری وابسته هستند. ساختار و خواص اتصالات جوش داده شده (مانند اندازه/شکل مناطق جوشکاری، توزیع سختی، تنش پسماند، عیوب و غیره) همچنین بر عملکرد کلی اتصالات تحت حالت‌های مختلف بارگذاری و شرایط کاری تأثیرگذار است. این موارد به‌طور مستقیم بر مناسب بودن هر فرآیند جوشکاری در اتصال آلیاژهای با آنتروپی بالا، کاربرد آنها و پیشرفت‌های آتی در زمینه‌های مرتبط تأثیرگذار هستند [۲].



شکل ۱ هندسه تشکیل شده توسط روش‌های مختلف جوشکاری [۲]

## ۲- آلیاژهای با آنتروپی بالا

همان‌طور که ذکر شد آلیاژهای با آنتروپی بالا آلیاژی هستند که از ترکیب حداقل پنج عنصر تشکیل می‌شوند. خواص مکانیکی این آلیاژها بر خلاف آلیاژهای متداول مستقل از عناصر تشکیل دهنده آنها است. بدین معنی که پارامتر مهم در تعیین خواص مکانیکی آلیاژهای با آنتروپی بالا از قبیل استحکام یا سختی در کنار سایر خواص، نوع ساختار آنها هستند. به‌طور مثال اگر ساختار آنها مکعب مرکز پر<sup>۱۲</sup> باشد دارای استحکام تسلیم بالایی

آلیاژها ترکیبات فلزی هستند که از یک عنصر فلزی اصلی (فلز پایه) و یک یا چند عنصر فلزی یا غیر فلزی تشکیل می‌شوند. هدف از آلیاژ کردن فلزات را می‌توان به بهبود بخشیدن خواص یک ماده مانند استحکام، سختی، چقرمگی و... دانست. این نوع آلیاژها بر یک فلز به‌عنوان پایه اصلی استوار هستند؛ اما دسته‌ای جدید از آلیاژها توسعه داده شده‌اند که در ساختار اصلی خود دارای حداقل پنج عنصر اصلی با درصد اتمی حدوداً برابر (عموماً مابین ۵٪ الی ۳۵٪) هستند [۱]. این نوع آلیاژها که با عنوان آلیاژهای با آنتروپی بالا<sup>۱</sup> شناخته می‌شوند، دارای استحکام تسلیم بسیار بالایی هستند و برخی از این نوع آلیاژها می‌توانند تا دمای ۸۰۰ درجه کلوین استحکام خود را حفظ کنند.

آلیاژهای با آنتروپی بالا را می‌توان با روش‌های مختلفی مانند روش‌های پردازش در فاز مایع (به‌عنوان مثال، ذوب قوس<sup>۲</sup>، انجماد بریچمن<sup>۳</sup>، اتمی شدن<sup>۴</sup> و روکش لیزری<sup>۵</sup>)، ساخت افزودنی، آلیاژسازی مکانیکی (مانند متالورژی پودر)، اختلاط عناصر حالت بخار<sup>۶</sup> مانند رسوب پاششی<sup>۷</sup>، رسوب لایه اتمی<sup>۸</sup> و رسوب فاز بخار<sup>۹</sup> تولید کرد. جوشکاری یک فرآیند پیچیده است زیرا شرایط یا عوامل زیادی بر فرآیند جوشکاری تأثیر می‌گذارد. کیفیت اتصالات جوش داده شده را می‌توان با ریزساختار نواحی جوشکاری تشکیل شده و یکپارچگی ساختاری مکانیکی جوش و همچنین خوردگی و خستگی ارزیابی کرد. بسیاری از فرآیندهای جوشکاری مختلف مانند جوشکاری قوس الکتریکی، جوشکاری لیزری، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، جوشکاری با پرتو الکترونی، جوشکاری نقطه ای مقاومت الکتریکی و همچنین فرآیندهای دیگری مانند جوشکاری الکتروسرباره<sup>۱۰</sup>، جوشکاری نفوذی در خلاء<sup>۱۱</sup> و غیره وجود دارد. این فرآیندهای جوشکاری از نظر مکانیسم جوشکاری، اصول کار تجهیزات و کارایی تفاوت قابل توجهی دارند، اما مشخص شده است که هر کدام کاربردهای گسترده ای در صنایع مختلف دارند. انرژی ورودی و حداکثر درجه حرارت در روش‌های مختلف و البته پارامترهای ورودی مختلف، متفاوت است که مستقیماً بر رفتار مواد مانند تبخیر، ذوب و خنک‌شدن تأثیر می‌گذارد. به‌عنوان مثال، چگالی گرما از ۱۰۵ تا ۱۰۶ وات بر سانتی متر مربع برای جوشکاری قوس

<sup>7</sup> Sputter deposition

<sup>8</sup> Atomic layer deposition

<sup>9</sup> Vapor phase deposition

<sup>10</sup> Electroslag welding

<sup>11</sup> Vacuum diffusion welding

<sup>12</sup> BCC

<sup>1</sup> High Entropy Alloy (HEA)

<sup>2</sup> Arc melting

<sup>3</sup> Bridgman solidification

<sup>4</sup> Atomization

<sup>5</sup> Laser cladding

<sup>6</sup> Mixing elements of the vapor state

آلیاژهای با آنتروپی بالا با توجه به ساختارشان نسبت به آلیاژهای معمولی دارای خواص مکانیکی فوق العاده از قبیل تنش تسلیم، تنش کششی نهایی و کرنش طولی بسیار بالا هستند. علاوه بر آن خواص این آلیاژها در دمای مختلف نیز قابل مقایسه هستند.

جدول (۱) بررسی خواص مکانیکی چند آلیاژ با آنتروپی بالا را در دماهای مختلف نشان می دهد.

خواهند بود اما اگر ساختار آنها از نوع مکعبی با وجوه مرکز پر<sup>۱</sup> باشد دارای استحکام تسلیم پایینی خواهد بود و در صورت ترکیب این دو ساختار به خواص مکانیکی مطلوبی می توان دست یافت [۳، ۴]. از جمله پارامترهایی را که بر خواص و ریزساختار آلیاژهای با آنتروپی بالا تأثیر می گذارد می توان به اثرات ترمودینامیکی، اعوجاج شبکه و اثر نفوذ کند اشاره نمود. آلیاژهای با آنتروپی بالا به دلیل خواص مکانیکی و فیزیکی مناسب جایگزین مناسبی برای آلیاژهای معمولی هستند [۴، ۵].

جدول ۱ مقایسه خواص مکانیکی آلیاژهای با آنتروپی بالا در دماهای مختلف [۶]

آلیاژ	خواص مکانیکی	دما (°K)				
		۷۷	۲۹۶	۶۷۳	۸۷۳	۱۰۷۳
CoCrFeNiMn	تنش تسلیم (MPa)	۷۵۹	۴۱۰	-	-	-
	تنش نهایی (MPa)	۷۶۳	۱۲۸۰	-	-	-
	کرنش طولی (%)	۷۱	۵۷	-	-	-
CoCrFeNiAl	تنش تسلیم (MPa)	-	۹۱۰	۱۵۵	۱۵۰	-
	تنش نهایی (MPa)	-	-	-	-	-
	کرنش طولی (%)	-	>۵۰	>۵۰	>۵۰	-
CoCrFeMn	تنش تسلیم (MPa)	۴۸۱	۲۷۲	-	-	-
	تنش نهایی (MPa)	۱۰۰۳	۵۶۷	-	-	-
	کرنش طولی (%)	۶۵	۴۷	-	-	-
CoCrFeNiAlTi	تنش تسلیم (MPa)	-	۱۴۲۰	۱۲۸۵	۷۹۵	۲۸۵
	تنش نهایی (MPa)	-	-	-	-	-
	کرنش طولی (%)	-	۱۸	۲۴	>۵۰	>۵۰
CoCrFeNiV	تنش تسلیم (MPa)	۴۷۷	۴۷۰	-	-	-
	تنش نهایی (MPa)	۱۰۰۰	۶۲۶	-	-	-
	کرنش طولی (%)	۶۲	۳۶	-	-	-

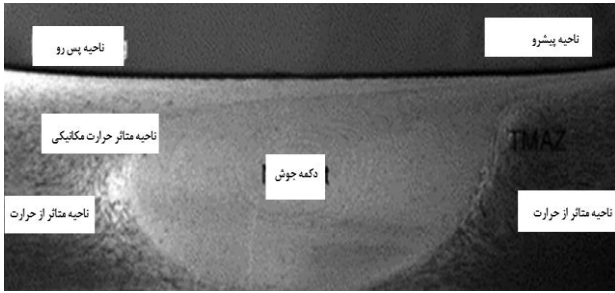
نمی کند و به مواد خطرناکی برای جوشکاری نیاز ندارد، و از آن می توان در اتصال به شکل های مختلف استفاده کرد [۸].

پردازش اصطکاکی اغتشاشی تکنیکی است که طراحی آن بر اساس جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی است. در صنعت از روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در کشتی سازی و ساخت قطار استفاده می شود. در این روش، اتصال حالت جامد تحت شرایط تغییر شکل شدید و اختلاط مواد توسط یک ابزار چرخشی با یک پین و شانه که در لایه های نزدیک به سطح نمونه قرار می گیرد تا با اغتشاش و سیلان مواد، اصلاح های ریزساختاری انجام شود. از مزایای پردازش اصطکاکی اغتشاشی می توان به انجام آن توسط

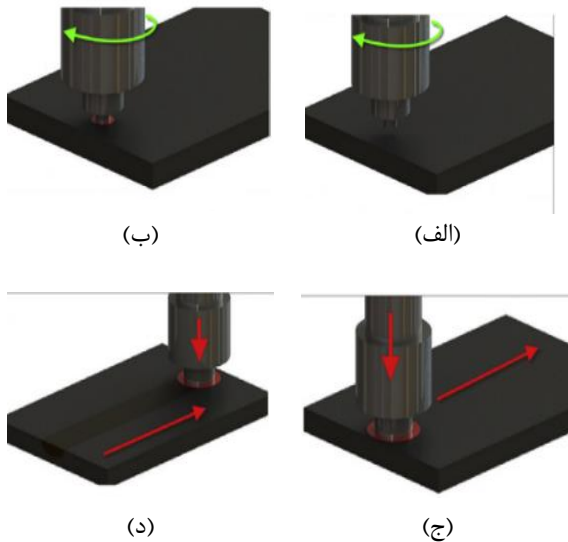
## ۲- جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی یک روش جوشکاری حالت جامد است که در آن از یک ابزار دوار غیرمصرفی برای تولید حرارت اصطکاکی و اتصال فلزات و پلیمرها در حالت جامد استفاده می شود [۷]. شماتیک این روش جوشکاری در شکل (۲) نشان داده شده است. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی مزایای متعددی دارد. از آن جمله تولید جوش های با استحکام بالا، نیروی خارجی فقط در هنگام فرورفتن ابزار اعمال می شود و از اینرو اعوجاج کمتری وجود دارد، نیازی به آماده سازی لبه ها و تمیز کردن سطوح فلزی وجود ندارد، دوستدار محیط زیست است زیرا هیچ بخاری تولید

<sup>۱</sup> FCC



شکل ۳ ناحیه ریزساختاری مختلف در ناحیه جوشکاری یا فرآوری- شده به روش اصطکاکی اغتشاشی [۹]



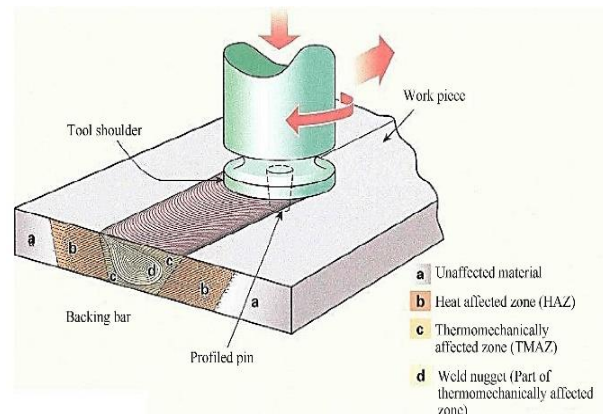
شکل ۴ مراحل پردازش اصطکاکی اغتشاشی؛ الف- ابزار چرخشی قبل از تماس با صفحه، ب- پین ابزار با صفحه تماس پیدا می کند و گرما ایجاد می کند، ج- شانه تماس برقرار می کند گسترش منطقه داغ را محدود می کند، د- ابزار دوار در طول نمونه حرکت می کند و یک ناحیه پردازش اصطکاکی اغتشاشی ایجاد می کند [۹]

در شکل (۴) نمایش شماتیکی از روش پردازش اصطکاکی اغتشاشی نشان داده شده است. به دلیل وجود اصطکاک بین شانه و پین ابزار و لایه نزدیک به سطح در فلز پایه، تولید گرما باعث جریان پلاستیکی و همچنین به هم زدن می شود و با خنک کردن مواد تا دمای محیط، در این روش یک ریز ساختار با دانه های ریز ناشی از تبلور مجدد بدون نقص تشکیل می شود. لذا می توان با استفاده از این روش، خواص مکانیکی اغلب فلزات را بهبود بخشید و برای اصلاح لایه های کامپوزیت سطحی که با استفاده از پودرهای سرامیکی تولید شده اند از آن استفاده کرد.

#### ۴- روش های تولید و خواص مکانیکی آلیاژهای با آنتروپی بالا

در این بخش ابتدا نحوه تولید و آلیاژسازی، خواص آلیاژهای با آنتروپی بالا و کاربرد آن ها در صنعت بررسی خواهد شد. آلیاژهای

ماشین های فرز، عدم انتشار گاز یا دود مضر و عدم تغییر اندازه محصول قبل و بعد از انجام فرآیند اشاره نمود. بنابراین می توان با تنظیم پارامترهای این فرآیند به خواص مورد نظر دست پیدا کرد. عمده تولید گرما در طول فرآیند توسط اصطکاک بین نمونه و شانه در حال چرخش ایجاد می شود. پین دوار ماده گرم شده را تغییر شکل می دهد، این مواد گرم شده که در اطراف پین دوار است جریان پیدا می کند و حفره ایجاد شده توسط پین ابزار را پس از عبور ابزار، پر می کند. پس می توان این فرآیند را یک روشی که در آن تغییر شکل داغ به صورت محلی اتفاق می افتد در نظر گرفت. اغتشاش مواد عموماً در لایه سطحی نمونه در مجاورت شانه چرخان رخ می دهد. در سرتاسر ناحیه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی تبلور مجدد دینامیکی رخ می دهد که باعث تولید دانه های جدید می شود و می توان آن را به سه دسته تقسیم کرد: (۱) تبلور مجدد دینامیکی ناپیوسته: با هسته زایی و رشد دانه های جدید، دانه های جدید ایجاد می شوند، (۲) تبلور مجدد دینامیکی پیوسته: شامل تشکیل مرزدانه ها با زاویه کم و افزایش تدریجی در جهت گیری نادرست مرزدانه ها در طول تغییر شکل داغ است که باعث می شود دانه های جدید ایجاد شوند و (۳) تبلور مجدد دینامیکی هندسی: از برخورد مرزدانه دنداندار که به صورت دانه هایی که در اثر تغییر شکل داغ به طور شدید کشیده می شوند ایجاد می شوند. ویژگی مکانیسم های نامبرده این است که دانه هایی که داخل یک نمونه قرار دارند تصفیه می شوند، ساختار منطقه پردازش شده را می توان به سه ناحیه متمایز طبقه بندی کرد: منطقه اغتشاشی، منطقه تحت تأثیر کار مکانیکی و حرارت و منطقه متأثر از حرارت که در شکل (۳) نشان داده شده است. تغییرات ریزساختاری در هر منطقه در خواص نمونه فرآوری شده موثر هستند که می توان به افزایش بسیار زیاد در استحکام، شکل پذیری، خستگی، سایش، خوردگی و چقرمگی شکست اشاره کرد. طبق یافته های اخیر افزایشی حدود ۸۵ درصد در استحکام و حد تحمل خستگی مواد به دست آمده است.



شکل ۲ شماتیک جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی [۸]

فلز پایه ایجاد می‌شود. قوس الکتریکی گرما تولید می‌کند و ناحیه اتصال فلز پایه را ذوب می‌کند. قوس الکتریکی و حوضچه جوش توسط گازهای بی‌اثر مانند آرگون، هلیوم یا مخلوط آن‌ها پوشیده شده است تا از اکسیداسیون محافظت کند. این روش یکی از متداول‌ترین روش‌های مورد استفاده در جوشکاری آلیاژهای با آنتروپی بالا است. در استفاده از این روش و سایر روش‌های ذوبی، تغییر چشمگیر در ریزساختار و استحکام اتصالات آلیاژهای با آنتروپی بالا گزارش شده است. همچنین انتقال فاز و جداسازی عنصری، در جوش با چرخه‌های حرارتی تحت گرمایش و سرد شدن سریع اتفاق می‌افتد [۱۳].

ژانگ و همکاران [۱۴] جوش‌پذیری CoCrFeMnNi به-عنوان یک آلیاژ با آنتروپی بالا و فولاد ضد زنگ را برای تعیین پتانسیل آنها برای کاربرد در زمینه‌های هسته‌ای و هوافضا مورد بررسی قرار دادند. به این منظور از جوش قوسی تنگستن با گاز محافظ استفاده شد و اتصال بدون نقصی حاصل شد. ریزساختار ناحیه همجوشی شامل یک فاز مکعب با وجوه مرکز پر بدون تشکیل ترکیبات بین فلزی است. با این حال، یک ناحیه مخلوط نشده در نزدیکی فولاد ضد زنگ وجود دارد که می‌توان آن را به سرد شدن فرعی ترکیب ناشی از دمای مایع پایین‌تر فلز جوش حجیم نسبت به فلز پایه نسبت داد. علاوه بر این، افزایش کمی در سختی ناحیه همجوشی مشاهده شد. این نتایج را می‌توان به پالایش دانه جوش و اثر تقویتی ناشی از ترکیب کربن نسبت داد. اتصالات استحکام کششی تقریبی ۴۶۵ مگاپاسکال و شکل‌پذیری ۳۸ درصد را نشان دادند که نزدیک به آلیاژ با آنتروپی بالا است. این اتصال برای کاربردهای سازه‌ای در دمای اتاق مناسب هستند.

اولیویرا و همکاران [۱۵] جوشکاری قوس تنگستن گازی ورق‌های آلیاژی با آنتروپی بالا CrMnFeCoNi مورد شده انجام شد. دانه‌بندی بزرگ و سختی کم، در محل شکست نمونه‌ها محل شکست را توجیه می‌کند. آفونسو و همکاران [۱۶] جوشکاری لیزری غیرمشابه بین یک آلیاژ با آنتروپی بالا CoCrFeMnNi و سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ را با موفقیت انجام داده‌اند. اتصالات بدون نقص با استحکام کششی ۸۲۲ مگاپاسکال و کرنش شکست ۷/۱ درصد به دست آمد. نتایج بیانگر جوش‌پذیری عالی بین دو آلیاژ است که امکان استقرار این جفت مواد متفاوت را برای کاربردهای سازه‌ای فراهم می‌کند. عباسیان و همکاران [۱۷] دو آلیاژ آنتروپی بالا با ساختار AlCoCrFeNi و با درصد متفاوت آلومینیوم را با فرایند جوشکاری قوسی تنگستن با گاز محافظ

با آنتروپی بالا را می‌توان در سه حالت جامد، مایع و بخار تولید کرد. روش حالت جامد همان روش آلیاژسازی مکانیکی است. روش‌های حالت مایع شامل روش قوس الکتریکی، ذوب مقاومت الکتریکی، ذوب القایی، ذوب لیزری و روکش‌کاری لیزری است. حالت بخار نیز شامل رسوب پاشش، رسوب لیزر پالسی و رسوب لایه اتمی است.

سختی آلیاژهای با آنتروپی بالا به سیستم‌های آلیاژسازی و نوع روش ساخت، عملیات حرارتی و ترکیب شیمیایی آن بستگی دارد و به‌طور معمول سختی آنها بین ۱۴۰ تا ۹۶۰ ویکرز متغیر است [۱۰، ۱۱]. فاز مکعبی مرکز پر در چندین سیستم از آلیاژهای با آنتروپی بالا از فاز مکعبی وجوه مرکز پر مستحکم‌تر است. از طرفی در ساختار مکعبی وجوه مرکز پر اتصال قوی بین اتمی برقرار است. در نتیجه آلیاژهای با این ساختار مدول الاستیسیته بالاتری و استحکام بالاتری نیز خواهد داشت. چرا که تنش بحرانی برای لغزش در ساختار مکعبی وجوه مرکز پر کوچکتر از ساختار مکعبی مرکز پر است [۱، ۱۲].

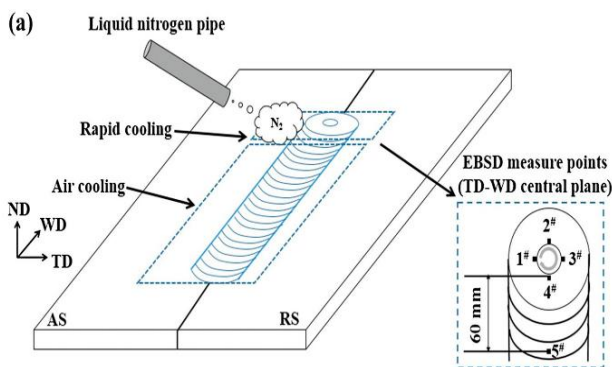
دما نقش تعیین‌کننده‌ای در خواص مکانیکی آلیاژها دارد اما این تاثیر در آلیاژهای متداول بیش از آلیاژهای با آنتروپی بالا است. به‌عنوان نمونه آلیاژهای با آنتروپی بالا در دماهای بالا تنش‌های تسلیم بهتری نسبت به آلیاژهای متداول دارند. به‌طور مثال اگر تنش تسلیم MoNbTaW و Haynes230 را در دمای بیش از ۱۲۷۳ درجه کلوین بررسی کنیم، آلیاژ با آنتروپی بالا دارای تنش تسلیم نهایی حدوداً ۴۵۰ مگاپاسکال در دمای ۱۸۷۳ است ولی تنش تسلیم نهایی آلیاژ معمولی حدوداً ۱۶ مگاپاسکال در دمای ۱۴۷۳ است. این نشانگر مهم بودن آلیاژهای با آنتروپی بالا نسبت به آلیاژهای معمولی است [۶].

## ۵- جوشکاری ذوبی آلیاژهای با آنتروپی بالا

به‌طور کلی روش‌های جوشکاری به دو دسته اصلی جوشکاری ذوبی و جوشکاری حالت جامد تقسیم می‌شود. در روش‌های ذوبی به منظور اختلاط مواد و ایجاد اتصال از ذوب مواد در ناحیه جوش استفاده می‌کند. در این بخش به بررسی روش‌های جوشکاری ذوبی مورد استفاده در جوشکاری آلیاژهای با آنتروپی بالا پرداخته شده است. جوشکاری قوس تنگستن با گاز محافظ<sup>۱</sup> همچنین به‌عنوان جوشکاری با گاز بی‌اثر تنگستن<sup>۲</sup> شناخته می‌شود، یک فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی است که در آن یک قوس الکتریکی بین یک الکترود آلیاژ تنگستن غیرمصرفی و

<sup>2</sup> TIG<sup>1</sup> GTAW

آلیاژهای با آنتروپی بالا لازم است تا از یک جنس سخت تر مثل کاربید تنگستن به منظور حداقل کردن سایش ابزار استفاده نمود [۲۱]. همان طور که در شکل دیده می شود، در حین این فرایند و برای جلوگیری از تغییر ساختار و بافت به طور مداوم نیتروژن مایع اسپری می شود و این تغییرات را متوقف می کند. در این مطالعه نشان داده شد که استحکام اتصال آلیاژهای با آنتروپی بالا را می توان بدون از دست دادن شکل پذیری با استفاده از خنک کننده فوق سریع در طول فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی افزایش داد.



شکل ۵ نمایی از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و خنک کاری نمونه [۱۹]

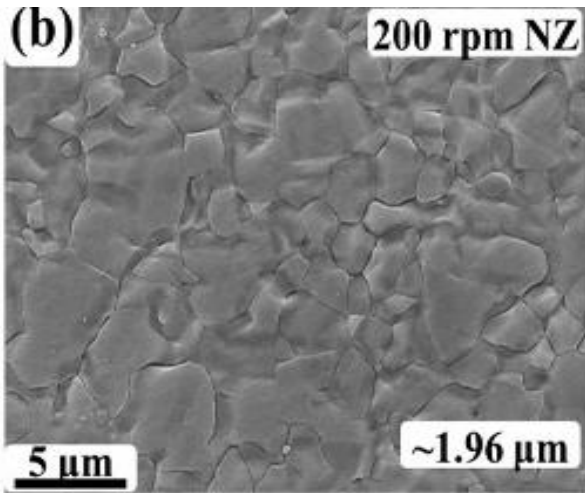
کوبین و همکاران [۲۲] جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را بر روی آلیاژ با آنتروپی بالای CoCrFeNi انجام دادند و اثر سرعت چرخش ابزار بر ریزساختار و خواص مکانیکی حاصل را بررسی کردند. پارامترهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی مانند سرعت چرخش ابزار، سرعت جوشکاری، حرارت ورودی، بر نحوه جریان مواد، تشکیل جوش و عملکرد آن تأثیر می گذارند. در این مطالعه نیز از یک ابزار از جنس کاربید تنگستن که از یک شانه به قطر ۱۲ میلی متر و یک پین استوانه ای به قطر ۴ میلی متر و به طول ۱/۳ میلی متر ساخته شده بود، استفاده شد. سرعت جوش ۵۰ میلی متر بر دقیقه و سرعت چرخش ابزار ۲۰۰ تا ۶۰۰ دور در دقیقه بود. با استفاده از این پارامترها اتصال لب به لب بدون حفره یا ترک بدست آمد. تبلور مجدد دینامیکی رخ داد و دانه های هم محور پالایش شده در ناحیه جوش تشکیل شدند. این دانه ها در شکل (۶) نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می شود، رشد دانه در ناحیه جوش به گرمای ورودی یعنی گرمای تولید شده توسط اصطکاک ابزار و تغییر شکل شدید پلاستیک مواد حساس بوده و اندازه دانه با افزایش سرعت چرخش ابزار بزرگتر می شود. در شکل (۷) نشان داده شده است که سختی ناحیه جوش پس از انجام فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی افزایش یافت. در سرعت چرخش ۲۰۰ دور در دقیقه،

آرگون بر روی فولاد ساده کربنی روکش دهی کردند. نتایج نشان داد که روکش دارای ساختار گلبرگی متشکل از فاز کریستالی با شبکه مکعبی مرکز پر همراه با فاز غنی از کروم بر روی مرز دانه ها است. در آلیاژ با مقدار آلومینیوم کمتر، فاز غنی از کروم حذف شده و به جای آن فاز جدید با شبکه کریستالی مکعبی با وجوه مرکز پر در انواع ویدمن اشتاتن و دندریتی تشکیل می شود. در آلیاژ با آلومینیوم بیشتر هر دو نوع ترک های مرز دانه ای و درون دانه ای ایجاد شده از نوع ترک انجمادی تشخیص داده شدند. همچنین تنش های حرارتی و ترد بودن فاز مکعبی مرکز پر به عنوان عوامل افزایش حساسیت به ترک تعیین شد. در آلیاژ حاوی آلومینیوم کمتر، ترکیبی از عواملی نظیر کاهش دامنه انجماد، تشکیل فاز مکعبی با وجوه مرکز پر دندریتی و کاهش سختی در نتیجه کاهش مقدار آلومینیوم، به عنوان عوامل حذف ترک در آلیاژ تشخیص داده شد.

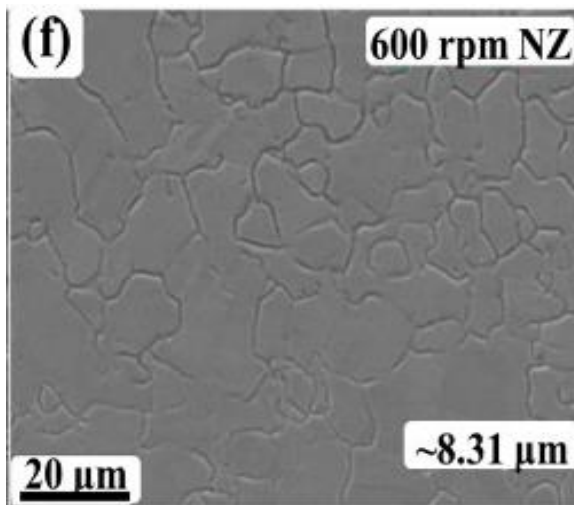
## ۶- جوشکاری حالت جامد آلیاژهای آنتروپی بالا

در این بخش به بررسی جوشکاری آلیاژهای با آنتروپی بالا در حالت جامد و به طور مشخص به روش اصطکاکی اغتشاشی پرداخته می شود. همچنین نتایج بدست آمده از آن و خواص و تغییرات مکانیکی ناشی از جوشکاری بررسی می شود. به طور کلی در تکنیک جوشکاری حالت جامد پس از انجام جوشکاری تنش های پسماند و اعوجاج در اتصالات رخ نمی دهد یا بسیار جزئی است و عملکرد اتصال به لحاظ خواص مکانیکی، در روش حالت جامد بسیار برتر از حالت ذوبی است. تحقیقات بر روی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای با آنتروپی بالا عمدتاً بر روی بهینه سازی پارامترهای مهم و مؤثر جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی متمرکز است [۱۸].

خو و همکاران [۱۹] خواص مکانیکی اتصالات به روش جوشکاری اغتشاشی اصطکاکی را بر روی آلیاژ با آنتروپی بالای CrMnFeCoNi را بررسی کردند و مکانیزم پالایش دانه را از طریق بررسی ویژگی های ریز ساختاری جوش ها در مرحله هم زدن و مرحله خنک کاری بعدی به طور جداگانه مطالعه کردند. شکل شماتیک جوشکاری و خنک کاری مورد استفاده در این مطالعه در شکل (۵) نشان داده شده است. در این مقاله به منظور جوشکاری از یک ابزار از جنس کاربید تنگستن با یک شانه مقعر به قطر ۱۲ میلی متر و یک پین استوانه ای به قطر ۴ میلی متر و طول ۱/۹ میلی متر استفاده شد. جنس متداول ابزار مورد استفاده در جوشکاری و پردازش اصطکاکی اغتشاشی فولاد ابزار گرم کار است [۲۰]. اما در مورد آلیاژهای با سختی بالا مثل فولاد و

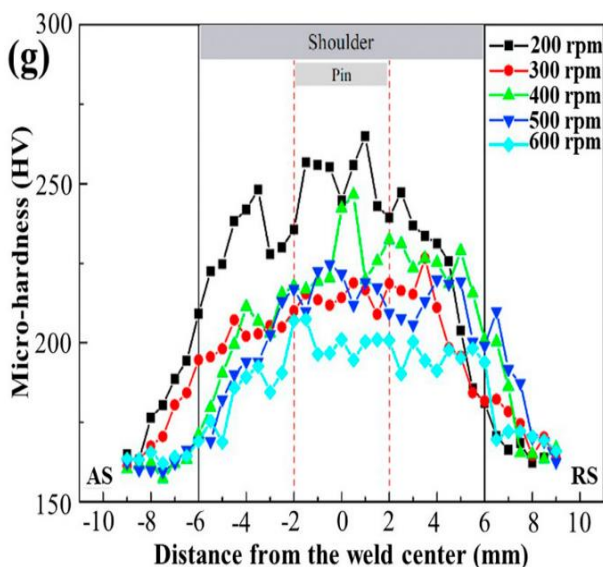


(ب)



(ج)

شکل ۶ اندازه دانه در الف- فلز پایه، ب- ناحیه جوش در سرعت چرخش ابزار ۲۰۰ دور در دقیقه، ج- ناحیه جوش در سرعت چرخش ابزار ۶۰۰ دور در دقیقه [۲۲]

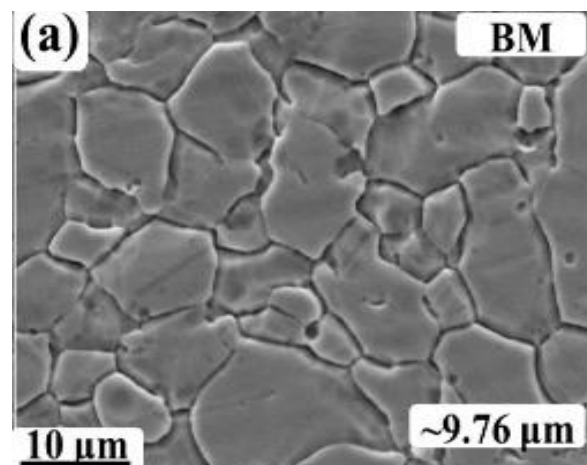


شکل ۷ پروفیل‌های میکروسختی در مقطع اتصالات [۲۲]

خواص مکانیکی اتصالات از جمله استحکام تسلیم در مقایسه با فلز پایه افزایش یافت.

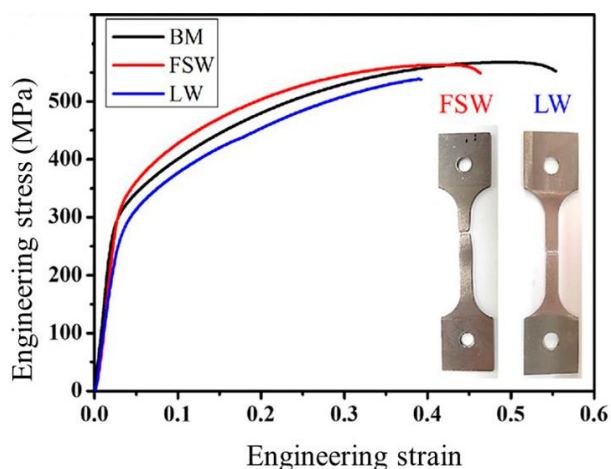
### ۷- مقایسه جوشکاری ذوبی و حالت جامد در اتصال آلیاژهای با آنتروپی بالا

جو و همکاران [۲۳] جوش‌پذیری آلیاژ CrMnFeCoNi را به روش اصطکاکی اغتشاشی بررسی کردند و ریزساختارها و خواص مکانیکی اتصالات را در حالت جوش داده شده به روش اصطکاکی اغتشاشی و جوش داده شده به روش لیزر را مقایسه کردند. مشاهده شد که مکانیزم‌های تشکیل شده حاصل از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با اتصالات جوش لیزر کاملاً متفاوت بوده است. برای اتصالات جوش داده شده به روش اصطکاکی اغتشاشی، تبلور مجدد دینامیکی تحت تأثیر پردازش حرارتی - مکانیکی، اندازه دانه‌ها از ۷۰ میکرون در فلز اصلی تا حدود ۵ میکرون در ناحیه جوش پالایش شده است. ریزساختار فلز پایه و نواحی جوشکاری شده با روش اصطکاکی اغتشاشی و جوشکاری لیزر به ترتیب در شکل (۸-الف)، (۸-ب)، و (۸-ج) نشان داده شده است. در ناحیه ذوب در جوشکاری لیزر مشاهده شد که ریزساختار ستونی با جهت‌گیری کریستالوگرافی تصادفی است و دندریت‌ها در سراسر مرزهای فلز اصلی و ناحیه ذوب تا خط مرکزی جوش کشیده شده‌اند. به دلیل تفاوت در ریزساختار اتصالات انجام شده، خواص مکانیکی مهم مانند استحکام تسلیم، استحکام کششی نهایی و افزایش طول (کرنش طولی) در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به مراتب از اتصال لیزری بیشتر است. همچنین با انجام تست کشش در اتصالات انجام شده به روش اصطکاکی اغتشاشی مشاهده شد که شکست در فلز اصلی اتفاق می‌افتد در حالی که نمونه‌های اتصالات لیزری در مرکز جوش در ناحیه ذوب دچار شکست شدند. نتایج آزمون کشش و نمونه‌های تست شده که به روش اصطکاکی اغتشاشی و جوش لیزر جوشکاری شده‌اند، در شکل (۹) نشان داده شده است.



(الف)

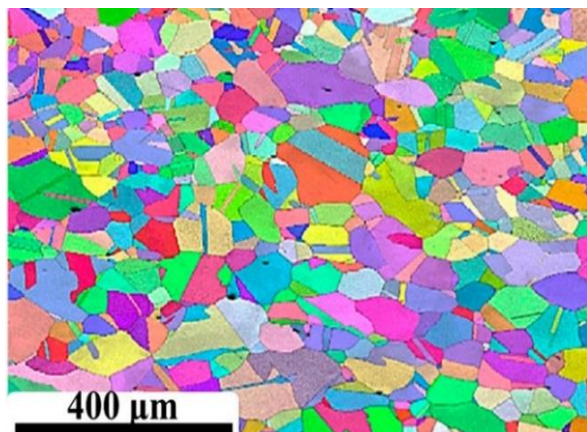
گاز از طریق پردازش اغتشاشی اصطکاکی است. ریزسختی و استحکام کششی نهایی نمونه تولید شده به این روش به ترتیب ۴۱/۳ و ۳۹/۱ درصد افزایش یافته است که دلیل آن ریزدانه شدن و توزیع یکنواخت ذرات با آنتروپی بالا است. لویز و همکاران [۲۵] تأثیری افزودن ذرات  $TiB_2$  با ابعاد میکرون بر ریزساختار آلیاژ با آنتروپی بالا  $AlCoCrFeNi$  را در حین جوشکاری قوسی تنگستن با گاز محافظ مورد بحث قرار داده‌اند جوشکاری قوسی تنگستن با گاز محافظ و فرآیندهای جوشکاری مبتنی بر ذوب منجر به ایجاد ساختارهای دانه بزرگ در ناحیه جوش می‌شوند که اغلب برای عملکرد اتصال مضر است. بنابراین، ادغام ذرات جوانه‌زا<sup>۱</sup> با دمای بالا در ناحیه جوش در حین جوشکاری یک راه بالقوه برای بهبود ریزساختار این ناحیه و در نتیجه عملکرد مکانیکی آن است. نتایج نشان داد که افزودن  $TiB_2$  قادر به تغییر ریزساختار منطقه جوش و پالایش آن است. با این وجود، تغییر شکل ترجیحی در منطقه تحت تأثیر حرارت نسبتاً نرم‌تر در طول آزمایش کشش منجر به شکست زودرس اتصالات، به دلیل سختی بالاتر ناحیه ذوب شده می‌شود.



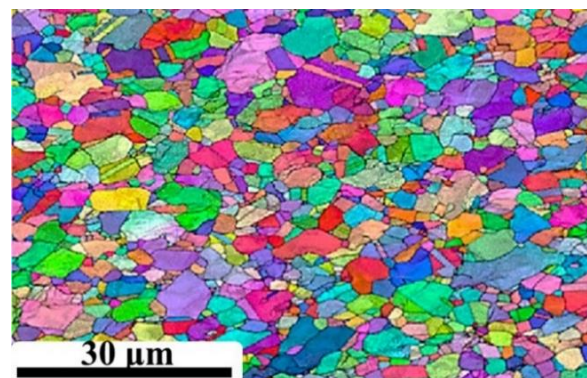
شکل ۹ نتایج تست کشش بر روی نمونه اتصالات جوش داده شده به روش اصطکاکی اغتشاشی و لیزر [۲۳]

شن و همکاران [۲۶] به مطالعه جوشکاری قوس فلزی گازی برای اتصال آلیاژ با آنتروپی بالا  $CoCrFeMnNi$  به صورت نورد شده با استفاده از مونل ۲۴۰۰ به عنوان سیم پرکننده پرداخته‌اند. نتایج نشانگر یک واکنش شیمیایی-متالورژیکی

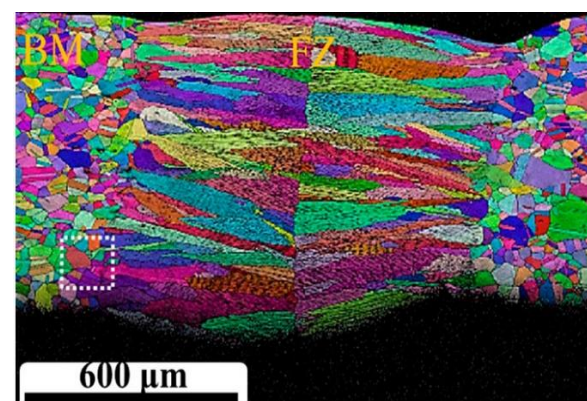
مطلوب بین پرکننده و آلیاژ است که منجر به اختلاط ترکیبی در منطقه جوش می‌شود. این امر منجر به تقویت اثر محلول جامد شده و سختی کم معمولی مرتبط با منطقه جوش را خنثی می‌کند. تغییر در اندازه دانه، فازهای موجود و بافت



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۸ ریزساختار آلیاژ با آنتروپی بالا در شرایط مختلف اتصال؛ الف- ریزساختار فلز پایه، ب- ریزساختار ناحیه جوش در اتصالات جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی، ج- ریزساختار ناحیه ذوب شده در جوش لیزر [۲۳]

## ۸- استفاده از افزودنی در حین اتصال و فرآوری

راگونا و همکاران [۲۴] یک آلیاژ با آنتروپی بالا بر روی سطح فولاد SS410 قرار داده‌اند تا خواص مکانیکی آن را برای کاربردهای صنعتی افزایش دهد. هدف از کار آنها اصلاح سطح فولاد SS410 با پودر  $AlCrCoFeNi$  سنتز شده با اتمیزاسیون

<sup>2</sup> Monel 400

<sup>1</sup>Inoculant

فلز پایه است، بیانگر برتری روش اصطکاکی اغتشاشی در ارائه استحکام بالاتر برای اتصالات است. همچنین نشان داده شد که طبق مطالعات انجام شده با استفاده از پردازش اصطکاکی اغتشاشی به عنوان یک روش فرآوری حالت جامد می توان ساختار آلیاژهای با آنتروپی بالا را تا حد زیادی بهبود بخشید. مطالعات جدید در این حوزه علاوه اتصال به استفاده از پودرهای تقویت کننده، پودرهای جوانه‌زا و مواد پرکننده در حین جوشکاری برای بهبود خواص مکانیکی و کنترل تحول ریزساختار اشاره دارند که به اختصار به تین مطالعات نیز پرداخته شد. یک حوزه مورد توجه نیز استفاده از پودرهای آنتروپی بالا به منظور روکش‌دهی آلیاژهای متداول و عمدتاً گریدهای مختلف فولاد است که با استفاده از روش‌های مختلف مبتنی بر جوشکاری مورد پژوهش قرار گرفته است و در این مقاله نیز به آنها اشاره شده است. در مجموع با توجه به خواص منحصر به فرد آلیاژهای با آنتروپی بالا به نظر می‌رسد کاربرد آنها در صنایع گوناگون رو به افزایش باشد و در نتیجه نیاز به مطالعه در این حوزه و به‌طور مشخص پژوهش به منظور اتصال موفق و پایدار این دسته از آلیاژها حداقل در دهه پیش رو یک حوزه جذاب پژوهشی باقی خواهد ماند.

#### ۱۰- مراجع

- [1] J. W. Yeh *et al.*, "Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: novel alloy design concepts and outcomes," *Advanced engineering materials*, vol. 6, no. 5, pp. 299-303, 2004, doi: <https://doi.org/10.1002/adem.200300567>.
- [2] J. Guo *et al.*, "Welding of High Entropy Alloys—A Review," *Entropy*, vol. 21, no. 4, doi: 10.3390/e21040431.
- [3] S. Gorsse, M. Nguyen, O. Senkov, and D. Miracle, "Database on the mechanical properties of high entropy alloys and complex concentrated alloys," *Data Brief*. 21 (2018) 2664–2678," ed, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.dib.2018.11.111>.
- [4] Y. Zhang *et al.*, "Microstructures and properties of high-entropy alloys," *Progress in materials science*, vol. 61, pp. 1-93, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2013.10.001>.
- [5] S. Varalakshmi, M. Kamaraj, and B. Murty, "Synthesis and characterization of nanocrystalline AlFeTiCrZnCu high entropy solid solution by mechanical alloying," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 460, no. 1-2, pp. 253-257, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2007.05.104>.

محل از جمله آثار مشاهده شده در این مطالعه است. اندازه دانه از فلز پایه به سمت منطقه جوش افزایش می‌یابد. یک ماتریس با وجوه مرکزپر و اکسیدهای ریز بر پایه Cr-Mn هم در مواد پایه و هم در منطقه متأثر از حرارت مشاهده شد. در منطقه جوش، فازها و کاربیدهای جدید با ساختار مکعبی با وجوه مرکز پر پس از اختلاط پرکننده موند ۴۰۰ تشکیل شد.

منصوری و خرسند [۲۷] اشاره کرده‌اند که به دلیل خواص آلیاژهای با آنتروپی بالا، این آلیاژها گزینه مناسبی برای استفاده به عنوان فلزات پرکننده در لحیم‌کاری سخت هستند. آنها در مطالعه خود سه پودر با ترکیب CoCrCuFeMnNi و نسبت-های ترکیب متفاوت را طراحی کرده و با استفاده از آلیاژسازی مکانیکی، نانو پودر پرکننده را سنتز نموده‌اند. از این پودر پرکننده در لحیم‌کاری سخت سوپر آلیاژ اینکول ۶۰۰ استفاده شده است. نتایج حاکی از رفتار انجماد تک فازی است. همچنین عدم وجود بور و سیلیکون در پرکننده آنتروپی بالا منجر به ایجاد یک ریزساختار پیوسته بدون اجزای یوتکتیک یا فازهای شکننده در فصل مشترک لحیم‌کاری سخت شده است. بالاترین استحکام برشی به دست آمده در این مطالعه ۵۴۵ مگاپاسکال است. در لحیم‌کاری با استفاده از فلز پرکننده معمولی، انجماد هم‌دما ناقص و متعاقب آن انجماد حرارتی مایع باقی‌مانده منجر به ایجاد فازهای شکننده می‌شود که در سراسر ریزساختار توزیع می‌شوند.

#### ۹- نتیجه‌گیری

در این مقاله به معرفی آلیاژهای با آنتروپی بالا، روش تولید و خواص آنها پرداخته شد. همچنین مطالعات انجام شده در یکی از موضوعات چالش برانگیز این حوزه یعنی جوشکاری این دسته از مواد جمع‌بندی شده و به‌صورت طبقه‌بندی شده خلاصه شد. بر طبق مطالعات انجام شده، علاوه بر این که خود فرآیند جوشکاری در کنار نوع ساختار شبکه‌ای آلیاژ، تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر خواص مکانیکی اتصال دارند. به‌طور مشخص با مقایسه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با سایر روش‌های جوشکاری مورد استفاده در اتصال آلیاژهای با آنتروپی بالا و به‌طور مشخص جوشکاری قوس تنگستن با گاز محافظ و جوشکاری لیزری، نشان داده شد که به دلیل ذات حالت جامد بودن این روش جوشکاری، تغییرات ریزساختاری عموماً به نفع بهبود خواص مکانیکی بوده و اتصالات نوعاً استحکام بهتری دارند. به‌عنوان مثال استحکام ۵۵۰ مگاپاسکالی برای اتصالات اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ CrMnFeCoNi که بیش از استحکام فلز پایه است در مقایسه با استحکام ۵۰۰ مگاپاسکالی جوش لیزر که کمتر از استحکام

- [15] J. P. Oliveira *et al.*, "Gas tungsten arc welding of as-rolled CrMnFeCoNi high entropy alloy," *Materials & Design*, vol. 1, p. 108505, 2020/04/01/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108505>.
- [16] D. Afonso *et al.*, "Dissimilar laser welding of an as-rolled CoCrFeMnNi high entropy alloy to Inconel 718 superalloy," *Optics & Laser Technology*, vol. 180, p. 111427, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2024.111427>.
- [17] N. Abbasian Vardin, T. Saeid, and A. R. Akbari, "Crack prevention by adjusting aluminum concentration in GTAW clad AlxCoCrFeNi high entropy alloy," *JWSTI*, vol. 9, no. 1, pp. 1-13, 2023, doi: 10.47176/JWSTI.2023.11.
- [18] J. Li, X. Meng, L. Wan, and Y. Huang, "Welding of high entropy alloys: Progresses, challenges and perspectives," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 68, pp. 293-331, 2021/08/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.05.042>.
- [19] N. Xu, Q. Song, and Y. Bao, "Microstructure evolution and mechanical properties of friction stir welded FeCrNiCoMn high-entropy alloy," *Materials Science and Technology*, vol. 35, no. 5, pp. 577-584, 2019/03/24 2019, doi: <https://doi.org/10.1080/02670836.2019.1573525>.
- [20] S. Pedrammehr *et al.*, "Experimental and Machine Learning Study on Friction Stir Surface Alloying in Al1050-Cu Alloy," *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol. 8, no. 4, doi: <https://doi.org/10.3390/jmmp8040163>.
- [21] J. Iwaszko and M. Sajed, "Technological Aspects of Producing Surface Composites by Friction Stir Processing—A Review," *Journal of Composites Science*, vol. 5, no. 12, doi: <https://doi.org/10.3390/jcs5120323>.
- [22] X. Qin, Y. Xu, Y. Sun, H. Fujii, Z. Zhu, and C. H. Shek, "Effect of process parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir welded CoCrFeNi high entropy alloy," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 782, p. 139277, 2020/04/24/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139277>.
- [23] M.-G. Jo *et al.*, "Microstructure and mechanical properties of friction stir welded and laser welded high entropy alloy CrMnFeCoNi," *Metals and Materials International*, vol. 24, no. 1, pp. 73-83, 2018/01/01 2018, doi: <https://doi.org/10.1007/s12540-017-7248-x>.
- [24] S. Ragunath, N. Radhika, S. A. Krishna, and L. Rajeshkumar, "A study on microstructural, mechanical properties and optimization of wear behavior of friction stir processed AlCrCoFeNi High Entropy Alloy reinforced SS410 using response
- [6] J. G. Lopes and J. P. Oliveira, "A Short Review on Welding and Joining of High Entropy Alloys," *Metals*, vol. 10, no. 2, p. 212, 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/met10020212>.
- [7] M. Sajed, J. W. Guerrero, and H. A. Derazkola, "A Literature Survey on Electrical-Current-Assisted Friction Stir Welding," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 3, doi: 10.3390/app13031563.
- [8] T. Sonar, M. Ivanov, E. Trofimov, A. Tingaev, and I. Suleymanova, "A critical review on solid-state welding of high entropy alloys— processing, microstructural characteristics and mechanical properties of joints," *Defence Technology*, vol. 34, pp. 78-133, 2024/04/01/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2023.08.001>.
- [9] M. Ebrahimi and M. A. Par, "Twenty-year uninterrupted endeavor of friction stir processing by focusing on copper and its alloys," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 781, pp. 1074-1090, 2019/04/15/ 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.12.083>.
- [10] S. Guo, C. Ng, and C. T. Liu, "Anomalous solidification microstructures in Co-free AlxCrCuFeNi<sub>2</sub> high-entropy alloys," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 557, pp. 77-81, 2013/04/25/ 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.01.007>.
- [11] Y. X. Zhuang, W. J. Liu, Z. Y. Chen, H. D. Xue, and J. C. He, "Effect of elemental interaction on microstructure and mechanical properties of FeCoNiCuAl alloys," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 556, pp. 395-399, 2012/10/30/ 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.07.003>.
- [12] C.-C. Tung, J.-W. Yeh, T.-t. Shun, S.-K. Chen, Y.-S. Huang, and H.-C. Chen, "On the elemental effect of AlCoCrCuFeNi high-entropy alloy system," *Materials Letters*, vol. 61, no. 1, pp. 1-5, 2007/01/01/ 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2006.03.140>.
- [13] T. Sonar, M. Ivanov, E. Trofimov, A. Tingaev, and I. Suleymanova, "A comprehensive review on fusion welding of high entropy alloys – Processing, microstructural evolution and mechanical properties of joints," *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, vol. 1, pp. 122-183, 2024/01/01/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2023.06.003>.
- [14] P. Zhang, Y. Qi, Q. Cheng, and X. Sun, "Welding Dissimilar Alloys of CoCrFeMnNi High-Entropy Alloy and 304 Stainless Steel Using Gas Tungsten Arc Welding," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 33, no. 7, pp. 3273-3282, 2024/04/01 2024, doi: 10.1007/s11665-023-08229-1.

- entropy alloy," *Materials & Design*, vol. 242, p. 112996, 2024/06/01/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2024.112996>.
- [27] E. Mansouri and H. Khorsand, "Similar jointing of Inconel 600 super alloy using nano structure powder filler with high entropy design," *JWSTI*, vol. 9, no. 2, pp. 77-92, 2024, doi: <https://doi.org/10.47176/JWSTI.2024.07>.
- surface methodology," *Heliyon*, vol. 10, no. 2, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24429>.
- [25] J. G. Lopes *et al.*, "Role of TiB<sub>2</sub> inoculation particles during welding of a AlCoCrFeNi high entropy alloy," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 995, p. 174694, 2024/08, ۲۰۲۴ /۱۵/doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.174694>.
- [26] J. Shen *et al.*, "Synergistic effects of Monel 400 filler wire in gas metal arc welding of CoCrFeMnNi high