



## پژوهش‌نامه ریخته‌گری

### مقاله پژوهشی:

# بررسی ریزساختار، خواص مکانیکی و حرارتی آلیاژ آنتروپی بالا CuNiAlCrFe ساخته شده به روش VAR

هانیه نهاوندی<sup>۱</sup>، حمید خرسند<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، شناسایی و انتخاب مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

۲- دانشیار، مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

\* نویسنده مکاتبه کننده: Email: [hkhorsand@kntu.ac.ir](mailto:hkhorsand@kntu.ac.ir)

### چکیده:

آلیاژهای آنتروپی بالا (HEAs) به دلیل داشتن ویژگی‌های منحصر به فردی که شامل استحکام مکانیکی زیاد، مقاومت در برابر خوردگی و پایداری در دماهای بالا می‌شود، توجه بسیاری را به خود جلب کرد. در میان روش‌های تولید آلیاژهای آنتروپی بالا، روش ریخته‌گری ذوب مجدد خلاء (VAR) به دلیل کنترل فرآیند ذوب و انجماد سریع مذاب از اهمیت بالایی برخوردار است. هدف از این پژوهش، ساخت آلیاژ آنتروپی بالا CuNiAlCrFe با ریزساختار و ترکیب شیمیایی یکنواخت و با خواص مکانیکی و حرارتی مناسب با استفاده از روش ریخته‌گری VAR است. بعد از تهیه شمش آلیاژ آنتروپی بالا CuNiAlCrFe توسط روش ریخته‌گری VAR، جهت صحت‌سنجی آلیاژ ساخته شده آنالیزهای EDX، XRD و همچنین تصاویر Map از ترکیب آلیاژ تهیه شد. تصاویر میکروسکوپ نوری نشان‌دهنده ساختار دندریتی آلیاژ ناشی از انجماد سریع و تائید دو فازی بودن آلیاژ آنتروپی بالای ساخته شده بود. در ادامه جهت مشخصه‌یابی خواص فیزیکی از آلیاژ آنتروپی بالا ساخته شده، آنالیز حرارتی DSC و TG گرفته شد. نتایج آنالیز حرارتی نشان داد که نقطه ذوب آلیاژ آنتروپی بالا CuNiAlCrFe دمای ۱۳۶۰ درجه سانتیگراد است که طی سیر تا دمای فوق هیچ تغییر جرمی مشاهده نشد. طی مطالعه آلیاژ آنتروپی بالا مذکور نمونه‌هایی جهت بررسی آزمون‌های مکانیکی نظیر کشش، میانگین سختی و میکروسختی صورت گرفت که نتایج به دست آمده به ترتیب استحکام نهایی ۳۰۰۰ MPa، ۵۷۷ ویکرز، فاز غنی از آهن ۱۶۰ ویکرز و فاز غنی از مس ۱۲۵ ویکرز بودند.

تاریخ دریافت: ۰۷ تیر ۱۴۰۳

تاریخ بازنگری: ۲۷ مرداد ۱۴۰۳

تاریخ پذیرش: ۰۴ شهریور ۱۴۰۳

### واژه‌های کلیدی:

آلیاژ آنتروپی بالا CuNiAlCrFe، انجماد سریع، ریزساختار، خواص مکانیکی

### ارجاع به این مقاله:

هانیه نهاوندی، حمید خرسند، بررسی ریزساختار، خواص مکانیکی و حرارتی آلیاژ آنتروپی بالا CuNiAlCrFe ساخته شده به روش VAR، پژوهش‌نامه ریخته‌گری، پاییز و

زمستان ۱۴۰۳، جلد ۸، شماره ۲، صفحات ۱۰۷-۱۱۵.

شناسه دیجیتال: (DOI): 10.22034/irj.2024.465005.1196

### ۱- مقدمه

و توسعه روی آلیاژهای نوین با نام آلیاژهای آنتروپی بالا توسط به<sup>۱</sup> و همکاران آغاز شد [1]. آلیاژهای آنتروپی بالا بر پایه چند عنصر بوده که بهینه‌ترین آن‌ها از پنج عنصر اصلی تشکیل می‌شوند. این آلیاژها دارای نسبت اتمی یکسان بوده که در مقایسه با سایر آلیاژها و سوپرآلیاژها از تفاوت ساختاری اصلی برخوردار هستند؛ لذا خواص، رفتار و ریزساختار متفاوتی نسبت به سایر آلیاژها دارند [۲].

با پیشرفت علم و توسعه صنایع مختلف، صنعت آلیاژسازی و ریخته‌گری نیز از روند صعودی قابل ملاحظه‌ای برخوردار شده‌اند. در دو دهه اخیر توجه به سوپرآلیاژها و آلیاژهای نوین با توجه به گستردگی خواص مورد نیاز و همچنین بهبود عملکرد قطعات در صنعت اهمیت زیادی پیدا کرده است. از شروع قرن ۲۱ تحقیق

<sup>1</sup> Jien-Wei Yeh

برای ساخت آلیاژهای آنتروپی بالا بایستی در الگوی طراحی آن از چند خواص و ویژگی اصلی مختص به این نوع آلیاژها پیروی نمود. نخستین مورد که در واقع مهمترین آن نیز است طراحی آلیاژ بر مبنای تئوری‌های ترمودینامیکی است. به عبارتی تعداد عناصر و نوع آن‌ها باید به گونه‌ای انتخاب شود تا اولین ویژگی آلیاژهای آنتروپی بالا یعنی رعایت مقدار  $\Delta S_{conf} \geq 1.5R$  باشد [3]. از طرفی سایر پارامترهای ترمودینامیکی مانند نیز مانند ثابت انتالپی اختلاط و اختلاف پارامتر شبکه به ترتیب  $\Omega \geq 1.1$  و  $\delta \leq 6.6\%$  پیشنهاد داده شده است. علاوه بر پارامترهای بیان شده یک پارامتر دیگر نیز وجود دارد که به نام غلظت الکترون والانس<sup>۱</sup> شناخته می‌شود و معیاری بر تشکیل محلول جامد و سایر ترکیبات آلیاژی است [۴].

آلیاژهای آنتروپی بالا باتوجه به ساختار شبکه و ترکیب فازی خواص متنوعی را دربر می‌گیرند و اثر کوکتل برای پیش‌بینی رفتار و خواص این نوع مواد از این جهت اهمیت دارد. در میان آلیاژهای آنتروپی بالا، آلیاژ کانتور با ترکیب آلیاژی CrCoAlMnFe یکی از معروف‌ترین آن‌ها بوده که دارای خواص مکانیکی بالاتر از فولادهای زنگ‌زن با چقرمگی شکست بالا است. باتوجه به مقدار کروم استفاده شده در این آلیاژ مقاومت به خوردگی آن نیز بهبود یافته است [5]. منگ تونگ و همکاران، آلیاژ آنتروپی بالا CoCrFeNi-x ( $x = \text{Cu, Al, Sn}$ ) به روش ریخته‌گری (VAR) ساخته و مقاومت به خوردگی آلیاژ را مورد بررسی قرار دادند نتایج نشان داد با افزودن Al مقاومت به خوردگی آلیاژ به طور قابل توجهی افزایش یافت [6]. لو و همکاران رفتار خوردگی آلیاژ آنتروپی بالا

Co40Fe35Cr16Ni8Ti1 ساخته شده توسط روش VAR را در محلول هنکس (مایع بدن شبیه سازی شده) مورد بررسی قرار دادند. پوشش آنتروپی بالا به دلیل داشتن کروم و نیکل مقاومت به خوردگی بالاتری را نسبت به ۳۰۴ Stainless steel نشان داد [۷]. در پژوهشی دیگر ژانگ و همکاران، آلیاژ آنتروپی بالا CoCrFeNi(100-xCx) را که توسط روش ریخته‌گری (VAR) تهیه شده بود تحت تست سایش سایند قرار دادند. افزایش کربن باعث تشکیل یک لایه اکسیدی در مسیر سایش شده و مقاومت به سایش آلیاژ آنتروپی بالا را افزایش داد. در غلظت کمتر از ۰/۲۸ درصد وزنی کربن، نرخ سایش به دلیل افزایش سختی آلیاژ کاهش یافت و با غلظت کربن بیشتر از ۰/۲۸ درصد وزنی، به دلیل کاهش چقرمگی آلیاژ نرخ سایش افزایش یافت [8]. وانگ و همکاران، آلیاژ AICrFeCoNi Bx با استفاده از فرآیند ریخته‌گری VAR تهیه کرده و خواص مکانیکی ترکیب را مورد بررسی قرار دادند. نمونه به ترتیب استحکام فشاری و تنش تسلیم ۲۰۴/۲۳ مگاپاسکال و ۱۲۵۰/۹۶ مگاپاسکال را نشان می‌دهد. آلیاژ انعطاف‌پذیری ۳۲.۷ درصد را نشان داد. با افزایش غلظت بور از ۰ تا ۰/۲، به ترتیب استحکام تسلیم، استحکام شکست و کرنش پلاستیک از ۸۵۰ مگاپاسکال به ۲۲۹۳ مگاپاسکال، ۸۰۵ مگاپاسکال تا ۱۰۷۹ مگاپاسکال و ۷ تا ۲۷ درصد افزایش یافت. افزایش استحکام به طور عمده به افزایش محلول جامد بور نسبت داده شد [9]. جدول ۱ خواص مکانیکی برخی آلیاژهای آنتروپی بالامشابه ترکیب CuNiAlCrFe ساخته شده توسط روش ریخته‌گری VAR را نمایش می‌دهد.

جدول ۱- خواص مکانیکی برخی از آلیاژهای آنتروپی بالا تولید شده به روش ریخته‌گری VAR.

| منابع | کرنش پلاستیک % | میکروسختی (HV) | استحکام تسلیم (MPa) | استحکام فشاری (MPa) | استحکام شکست (MPa) | آلیاژ         |
|-------|----------------|----------------|---------------------|---------------------|--------------------|---------------|
| [۱۰]  | 32/7           | 501/3          | 1250/96             | 2004/23             | 850                | AlCoCrFeNi    |
| [۱۱]  | 20/7           | 515/5          | 1079                | ۱۸۲۰                | 2293               | CoCrFeNiCuAl  |
| [۱۲]  | 28/5           | 472/4          | 1406/2              | 1678                | 2926/2             | AlCrFeNi      |
| [۱۳]  | 0              | 853/8          | 1512/5              | 1678                | 2926/2             | AlCrFeNiMo0/8 |
| [۱۴]  | 1/7            | 459 ± 6        | 1285 ± 6            | 1398/8              | 1857 ± 8           | AlCoCuFeNiCr  |

<sup>1</sup> Valence Electron Concentration

میکروسختی پرداخته شد. در آخر نیز نتایج بدست‌آمده از آنالیزها و آزمون‌های مکانیکی تحلیل و بررسی گردید.

## ۲- روش تحقیق

### ۲-۱- طراحی آلیاژ آنتروپی بالا با روابط ترمودینامیکی

به کمک علم ترمودینامیک می‌توان شرایط تعادلی مواد را تعیین کرد. انرژی آزاد گیبس معیاری برای مشخص کردن تعادل در سیستم‌های ترمودینامیکی است هرچه این انرژی کمتر باشد، سیستم در آن شرایط پایدارتر است [19]. اگر تحول ترمودینامیکی حاصل اختلاط چند نوع اتم باشد، رابطه (۱) نمایش داده می‌شود.

$$\Delta G_{Mix} = \Delta H_{Mix} - T\Delta S_{Mix} \quad (1)$$

برای یک آلیاژ آنتروپی بالا با نسبت‌های اتمی برابر، انتخاب پنج عنصر اصلی می‌تواند، حداقل آنتروپی اختلاط عناصر را ایجاد کند. نکته قابل توجه درباره آلیاژهای آنتروپی بالا این است که تعداد فازهای قابل مشاهده در این آلیاژها از تعداد فازهای قابل انتظار از قانون فازها کمتر است. علت این موضوع وجود آنتروپی وضعیتی با در این دسته از آلیاژها است که باعث افزایش حلالیت متقابل و تشکیل فازهای محلول جامد می‌شود [20].

بررسی معیارهای ترمودینامیکی از جمله آنتالپی اختلاط ( $\Delta H_{mix}$ )، آنتروپی اختلاط ( $\Delta S_{mix}$ )، پارامتر  $\Omega$ ، اختلاف اندازه اتمی ( $\delta$ ) و غلظت الکترون والانس (VEC) برای اطمینان از تشکیل محلول جامد برای آلیاژ آنتروپی بالا CuNiAlCrFe محاسبه شد [21]. جدول ۲، مل موارد محاسبه شده و پیش‌بینی شده آلیاژ آنتروپی بالای طراحی شده است.

در آلیاژ آنتروپی بالا CuNiAlCrFe با توجه به اجزای تشکیل‌دهنده آن مقاومت به خزش و اکسیداسیون اهمیت بالایی داشته لذا از این آلیاژ فقط به عنوان پوشش‌های مقاوم به حرارت استفاده شده است. [۱۵، ۱۶]

روش‌های متفاوتی برای تولید آلیاژهای آنتروپی بالا وجود داد که در این میان روش ریخته‌گری ذوب مجدد خلاء ((VAR)) به دلیل امکان کنترل فرآیند ذوب و همچنین انجماد سریع از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. [۱۷] انجماد سریع در این فرآیند باعث تشکیل فازهای محلول جامد شده و خواص نهایی آلیاژ را بهبود می‌بخشد. دمای ذوب بالا و همچنین حضور خلاء در طی این فرآیند باعث حذف ناخالصی‌ها و به حداقل رساندن جدایش در ساختار شده و در این روش می‌توان مواد با نقطه ذوب بالا را ذوب کرد. علت اصلی انتخاب روش VAR در این پژوهش، استفاده از حجم کمتر مواد اولیه نسبت به سایر روش‌ها مثل VIM بوده و در مقیاس آزمایشگاهی علاوه بر ویژگی‌های ذکر شده، روشی اقتصادی است [18].

هدف از این پژوهش مشخصه‌یابی یکی از آلیاژهای آنتروپی بالا به دلیل نوظهور بودن آن است. با در نظر گرفتن آن که آلیاژ آنتروپی بالا CuNiAlCrFe در بیشتر مواقع چون کاربرد پوششی داشته به صورت آلیاژسازی مکانیکی تولید می‌گردید، در این پژوهش با توجه به اختلاف بالای آنتالپی اختلاط بالایی که بین مس و آلومینیم با سایر اجزا دارد، از روش آلیاژسازی با انجماد سریع تهیه گردد. سپس با آنالیز پراش اشعه ایکس و آنالیز عنصری کیفی Map از صحت‌سنجی آنتروپی بالا بودن آلیاژ مطمئن شده و از شمش تهیه شده آنالیز حرارتی جهت بررسی دمای استحاله و نقطه ذوب آن استفاده شد. در ادامه به بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی نظیر استحکام کششی، سختی و

جدول ۲- پارامترهای طراحی آلیاژ آنتروپی بالا CuNiAlCrFe

| کمیت‌های ترمودینامیکی | $\Delta S_{Conf}$ | $\Delta H_{Mix} \left( \frac{J}{mol} \right)$ | VEC | $\delta (A)$ | Tm °C |
|-----------------------|-------------------|---|-----|--------------|-------|
| مقدار                 | ۱۳/۳۸             | ۰/۳۲  | ۷/۶ | ۵/۶۱۷        | ۱۳۲۹  |

جدول ۳- محاسبات درصد اتمی و درصد وزنی عناصر آلیاژ آنتروپی بالا CuNiAlCrFe

| ردیف | عناصر         | ساختار سلول واحد | جرم اتمی | درصد وزنی | درصد اتمی | خلوص  |
|------|---------------|------------------|----------|-----------|-----------|-------|
| ۱    | مس (Cu)       | FCC              | ۶۳/۵۴۶   | ۲۴/۷۲۰    | ۲۰        | ۹۹/۹۶ |
| ۲    | نیکل (Ni)     | FCC              | ۵۸/۶۹۳   | ۲۲/۸۳۲    | ۲۰        | ۹۹/۹۵ |
| ۳    | آلومینیم (Al) | FCC              | ۲۶/۹۸۱   | ۱۰/۴۹۶    | ۲۰        | ۹۹/۹۹ |
| ۴    | کروم (Cr)     | BCC              | ۵۱/۹۹۶   | ۲۰/۲۲۷    | ۲۰        | ۹۹/۹۷ |
| ۵    | آهن (Fe)      | BCC              | ۵۵/۸۴۵   | ۲۱/۷۲۴    | ۲۰        | ۹۹/۹۵ |

## ۲-۲- ساخت و آنالیزها

برای ساخت آلیاژ آنتروپی بالا CuNiAlCrFe از کوره ذوب مجدد قوسی تحت خلاء استفاده شد. عناصر فلزی تشکیل-دهنده آلیاژ آنتروپی بالا CuNiAlCrFe با خلوص بالای ۹۹/۹ درصد اتمی از شرکت ذوب کالا شمیم تهیه شد. درصد اتمی و وزنی عناصر در جدول ۳ ذکر شده است. سپس با توجه به آنالیزها و آزمون‌های مورد نیاز قالب‌هایی ساخته شد تا حجم مورد نیاز برای تهیه نمونه‌های آزمون کشش، سختی و متالوگرافی را بتوان از آن تهیه نمود. دو شمش آلیاژ آنتروپی بالا ریخته‌گری شده با جرم نهایی نزدیک یک کیلوگرم ساخته شد. در شکل ۱، تصویر کوره ریخته‌گری استفاده شده جهت ساخت آلیاژ آنتروپی بالا CuNiAlCrFe نشان داده شده است.

پارامترهای دستگاه ریخته‌گری ذوب مجدد قوس الکتریک تحت خلاء در جدول ۴ ذکر شده است. در این روش برخلاف سایر روش‌های ریخته‌گری، فرایند آلیاژسازی از پنج مرحله ذوب پیاپی در قالب مسی که انتقال حرارتی به شدت بالایی را دارد استفاده می‌شود. این ویژگی باعث همگن شدن ترکیب و ریزساختار در سراسر آلیاژ آنتروپی بالا شده و از طرفی از جدایش و تشکیل فازهای مخرب در اثر اختلاف بالای انتالپی اختلاط بین اجزای تشکیل دهنده جلوگیری می‌کند.



شکل ۱- تصویر کوره ریخته‌گری استفاده شده.

جدول ۴- پارامترهای دستگاه ذوب مجدد قوس الکتریک تحت خلاء

مورد استفاده

| کمیت  | فشار (mbar) | دما (°C) | توان (KW) | فرکانس (kHz) |
|-------|-------------|----------|-----------|--------------|
| مقدار | ۵-۱۰        | ۲۸۰۰     | ۱۰۰       | ۲۸           |

بعد از ساخت شمش‌های آلیاژ آنتروپی بالا CuNiAlCrFe هر یک از شمش‌ها جهت آزمون و آنالیز مورد نیاز طبق استاندارد نمونه سازی شد. نمونه‌ها به ترتیب با استفاده از آنالیزهای XRD و عنصری کیفی Map صحت‌سنجی شدند. آنالیز فازی XRD توسط دستگاه PHILIPS مدل PW1730 با توان ۲/۲ KW و ولتاژ

۶۰ KV انجام شد. سپس نمونه‌های آلیاژ آنتروپی بالا مذکور تحت آماده‌سازی سطحی با شماره سنباده‌های ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۱۰۰۰ قرار گرفتند و در نهایت جهت صیقلی شدن سطح نمونه و انجام آزمون متالوگرافی پولیش شدند.

نمونه‌های پرداخت شده با محلول اچ<sup>۱</sup> حاوی دو اسید با ترکیب شیمیایی (HCl:HNO<sub>3</sub> = 3:1) به مدت ۱۰ ثانیه غوطه‌ور شدند. سپس از نمونه آلیاژ آنتروپی بالا CuNiAlCrFe اچ شده با میکروسکوپ نوری ساخت ایران مدل IMM-420 در سه بزرگنمایی ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ تصویربرداری شد. لازم به ذکر است که جهت اندازه‌گیری کسر حجمی فازهای رویت شده از نرم‌افزار Image J-Pro استفاده شد.

برای بررسی دقیق فازهای آشکار شده در آزمون متالوگرافی از آنالیز عنصری EDS با استفاده از میکروسکوپ الکترونی FE-SEM مدل VEGA 3 انجام شد. برای شناسایی دماهای استحاله و نقطه ذوب دقیق آلیاژ ساخته شده از دستگاه STA با برند NETZSCH و مدل Jupiter-449 f3 که قابلیت اندازه‌گیری هم‌زمان دو آنالیز حرارتی<sup>۲</sup> DSC و TG<sup>۳</sup> را دارد بهره‌گیری شد.

آزمون‌های مکانیکی در دو بخش آزمون کشش و سختی‌سنجی روی نمونه‌های آلیاژ آنتروپی بالا مورد بحث صورت گرفت. نمونه‌های آزمون کشش طبق استاندارد ASTM-E8 با دستگاه Wire cut از شمش‌های ساخته شده آلیاژ آنتروپی بالا تهیه شدند. آزمون کشش با دستگاه کوپا مدل TB1-10T و نرخ کشش ۱۰ mm/min صورت گرفت. آزمون سختی با استاندارد ISO-6506-2 در دو بخش سختی‌سنجی ماکرو HV30 و میکرو HV1 به ترتیب با استفاده از دستگاه سختی‌سنج یونیورسال مدل UV1 و میکروسختی مدل MH3 ساخت شرکت کوپا صورت گرفت.

## ۳- نتایج و بحث

### ۳-۱- ریزساختار و آنالیز فازی آلیاژ آنتروپی بالا CuAlNiCrFe

با توجه به محاسبات ترمودینامیکی صورت گرفته و انطباق آن با نتایج آنالیزهای فازی و میکروساختار، می‌توان نتیجه گرفت آلیاژ آنتروپی بالا CuAlNiCrFe دو فازی است. تصاویر میکروسکوپ نوری از ساختار دندریتی آلیاژ ناشی از فرایند ریخته‌گری در شکل ۲ ارائه شده است. حفرات موجود در تصاویر میکروسکوپ نوری ناشی از انجماد سریع ناشی از فرایند VAR است، البته مقدار حفرات تشکیل شده به نسبت سایر فرایندهای ریخته‌گری کمتر است [22, 23]. تصاویر متالوگرافی شکل ۲ نشان می‌دهد

<sup>3</sup> Thermogravimetric analysis

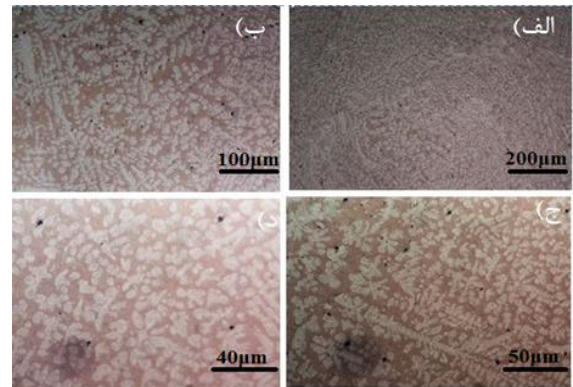
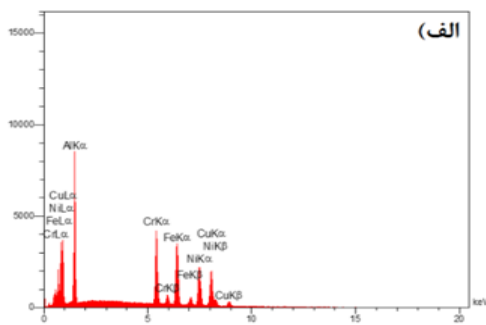
<sup>1</sup> Etchant solution

<sup>2</sup> Differential scanning calorimetry

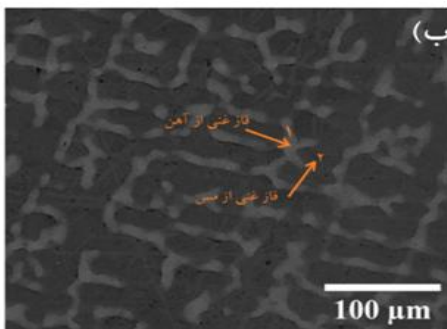
جهت پیش‌بینی فازهای بوجود آمده در آلیاژ آنتروپی بالا CuAlNiCrFe آنالیز عنصری از مناطق دندریتی و زمینه آلیاژ آنتروپی بالا گرفته شد. نتایج بدست آمده همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود شامل مناطق تیره رنگ یا فاز زمینه بوده که غنی از مس است و دندریت‌ها فازهایی غنی از آهن هستند که در جدول ۵ مقادیر درصد وزنی هر یک از عناصر در بخش‌های مختلف آن‌ها ذکر شده‌است. با توجه به الگوی پراش اشعه ایکس که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، ترکیب آلیاژ آنتروپی بالا CuAlNiCrFe شامل دو فاز با ساختار شبکه متفاوت بوده که باتوجه به آنالیزهای عنصری در شکل ۴ به ترتیب فازهای تیره FCC و فازهای دندریتی BCC است. فاز FCC در واقع محلول جامدی بوده که شامل عنصر اصلی مس بوده که با نیکل ترکیب محلول جامد را تشکیل داده است. از طرفی فاز دندریتی شامل ترکیب بین‌فلزی آهن با کروم و سایر عناصر آلیاژی است که ساختاری ترد به نسبت ساختار زمینه تشکیل داده است.

آلیاژ آنتروپی بالای ساخته شده دارای دو فاز دندریتی و زمینه بوده که دندریت‌ها شامل دندریت‌های اولیه و ثانویه هستند. غالباً در فرایندهای ریخته‌گری انجماد سریع مانند روش VAR بازوها دندریتی که به دندریت‌های ثانویه معروفند در ستون دندریت-های اولیه جوانه زنی و رشد می‌کنند. مقادیر فازی از نتیجه نرم افزار Image.J به ترتیب ۶۴ درصد ساختار دندریت و ۳۶ درصد آن فاز زمینه می‌باشد.

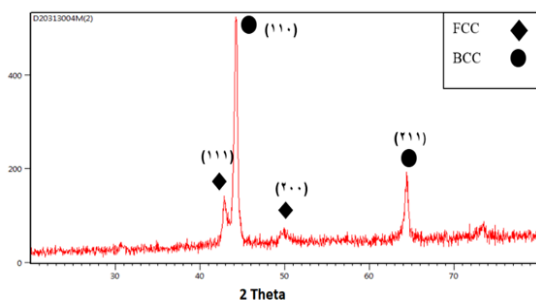
شکل ۳ تصاویر از آنالیز کیفی Map مربوط به میکروسکوپ الکترونی روبشی را نشان می‌دهد. مطابق با تصاویر نقشه توزیع عناصر، پراکندگی متناسب عناصر در زمینه و فازهای دندریتی نشان‌دهنده ساخت آلیاژ آنتروپی بالا با درصدهای اتمی مساوی مطابق با منابع و نتایج ترمودینامیکی است.



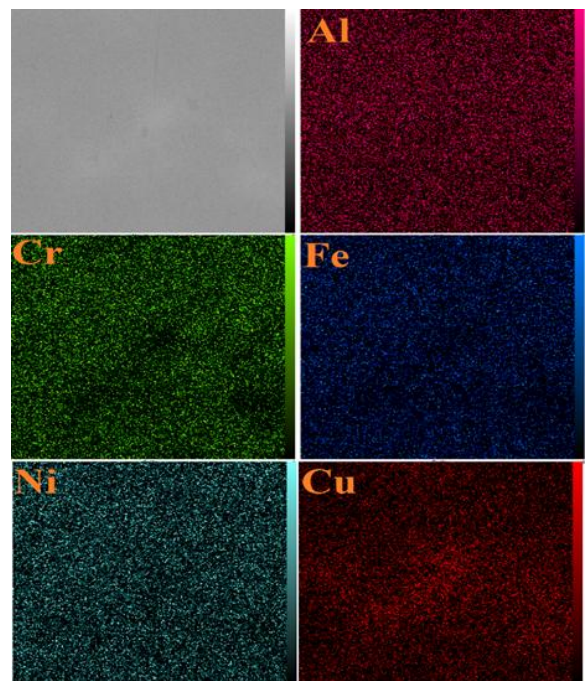
شکل ۲- تصاویر میکروسکوپ نوری از سطح نمونه ریخته‌گری آنتروپی بالا CuAlNiCrFe



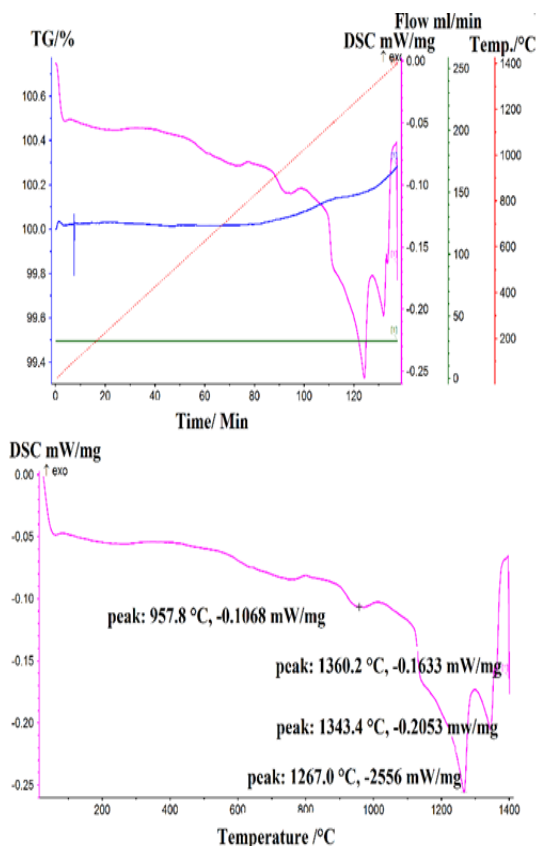
شکل ۴- الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی، ب) آنالیز عنصری آلیاژ آنتروپی بالا CuAlNiCrFe.



شکل ۵- آنالیز فازی آلیاژ آنتروپی بالا CuAlNiCrFe



شکل ۳- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه آلیاژ آنتروپی بالا CuAlNiCrFe.



شکل ۶- تصاویر آنالیز حرارتی گراف به دست آمده از آنالیز آلیاژ آنتروپی بالا CuAlNiCrFe.

### ۳-۳- خواص مکانیکی

مقدار سختی متوسط برای آلیاژ آنتروپی بالا CuAlNiCrFe توسط قوانین مخلوطها محاسبه شد [۲۴]. نتایج سختی تئوری و عملی در جدول ۷ ارائه شده است.

باتوجه به مقادیر جدول ۷ میانگین سختی بدست آمده با سختی تئوریک تفاوت زیادی ندارد، لذا می توان نتیجه گرفت ماده از همگنی ساختاری قابل قبولی برخوردار است. در ادامه جهت بررسی دقیق تر فازی، میکروسختی از فازهای غنی از مس و غنی از آهن به صورت جداگانه گرفته شد که به ترتیب نتایج آن ۱۲۵ و ۱۶۰ ویکرز بدست آمد. بالا بودن سختی ناحیه غنی از آهن در مقابل ناحیه غنی از مس به دلیل ساختار بین فلزی ناحیه غنی از آهن است.

نتایج آزمون کشش (تنش- کرنش مهندسی) از نمونه آلیاژ آنتروپی بالا CuAlNiCrFe نشان داد (شکل ۷) که استحکام نهایی و درصد ازدیاد طول این آلیاژ ۳۰۰۰ MPa و ۳/۵ درصد اندازه گیری شده که به نسبت سایر آلیاژهای آنتروپی بالا از استحکام قابل توجهی برخوردار است.

با استفاده از نرم افزار Xpert پارامتر شبکه برای دو فاز غنی از مس و آهن محاسبه شد که در جدول ۶ ذکر شد. مقادیر بدست آمده از پارامتر شبکه دو فاز موجود در آلیاژ آنتروپی بالا نشان می دهد که اعوجاج شبکه در ساختار آلیاژ آنتروپی بالا CuAlNiCrFe رخ داده است.

جدول ۶- محاسبه پارامتر شبکه با توجه قانون براگ

| پارامتر           | مقدار ( $A^0$ ) |
|-------------------|-----------------|
| ثابت شبکه FCC (a) | ۳/۵۴۰۳          |
| ثابت شبکه BCC (a) | ۲/۸۶۳۲          |
| فاصله صفحات (d)   | ۲/۰۴۴           |
| فازها (سلول واحد) | BCC و FCC       |

### ۳-۲- آنالیز حرارتی

برای مطالعه رفتار حرارتی آلیاژ آنتروپی بالا ساخته شده آنالیز گرماسنجی روبشی تفاضلی (DSC) و آنالیز وزن سنجی حرارتی (TGA) تا دمای ۱۴۰۰ درجه سانتی گراد با نرخ ۱۰ درجه سانتی گراد بر دقیقه انجام شد. شکل ۶ الف گراف مربوط به آنالیز حرارتی (DSC) و وزن سنجی حرارتی (TGA) را توأم نمایش می دهد. با توجه به گراف شکل ۶ ب، چهار پیک اصلی ناشی از نوعی استحاله (گرمازا و گرماگیر) در آلیاژ آنتروپی بالا CuAlNiCrFe در چهار دمای مختلف را نمایش میدهد. مطابق گراف شکل ۶ آلیاژ آنتروپی بالا CuAlNiCrFe متاثر از استحاله گرماگیر است. با توجه به نتایج حاصل می توان دریافت که دمای ذوب به دست آمده به صورت تئوریک مشابهت زیادی به دمای ذوب به دست آمده حاصل از آنالیز گرماسنجی روبشی تفاضلی دارد. گراف آبی شکل ۶ الف نشان دهنده تغییر وزن نمونه تا دمای ۱۴۰۰ درجه سانتی گراد است. با توجه به وزن نمونه انتخابی آنالیز حرارتی که ۱۴۰ mg تعیین شد، باتوجه به تغییر وزن جزئی ۰/۰۳۹۲ mg می توان استنباط کرد که آلیاژ آنتروپی بالا تا دمای تعیین شده هیچگونه جدایش یا حذف عنصری را نداشته و آلیاژ ساخته شده کاملاً بلوری است و نقطه ذوب مشخصی دارد.

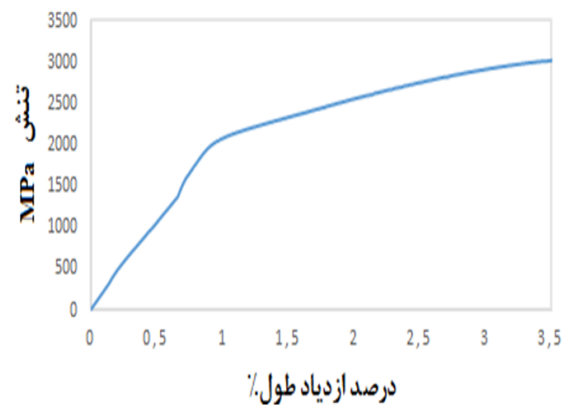
استحاله ها در آلیاژ آنتروپی بالا CuAlNiCrFe از دمای ۹۵۷ درجه سانتی گراد به صورت گرماگیر آغاز شد. سپس با افزایش دما تا ۱۲۶۷ درجه سانتی گراد استحاله در پیک نزولی شدیدی به صورت نقطه عطف ایجاد شد. پیش بینی می شود در این دما فازهایی در آلیاژ آنتروپی بالا شروع به جوانه زنی کرده باشند که با افزایش دما تا ۱۳۴۳ درجه سانتی گراد فازهای کمی تجزیه گشته و استحاله گرمازا ایجاد شده که در راستای آن در دمای ۱۳۶۰ درجه سانتی گراد در نهایت ذوب شده است.

## مراجع

- [1] Tokarewicz M, Grądzka-Dahlke M. Review of recent research on AlCoCrFeNi high-entropy alloy. *Metals*, 2021, 11(8) 1302.
- [2] Xiong W., Guo A.X.Y., Zhan S., Liu C.T., Cao S.C. Refractory high-entropy alloys: A focused review of preparation methods and properties, *Journal of Materials Science and Technology*, Chinese Society of Metals, 2023, 142, 196-215.
- [3] Wang K., Chen R., Yang H., Chen Y., Jia H., He Y., et al. The Elements selection of high entropy alloy guided by thermodynamics and the enhanced electrocatalytic mechanism for oxygen reduction reaction, *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(7) 2310683.
- [4] Mandal P., Choudhury A., Mallick A.B., Ghosh M., Phase Prediction in high entropy alloys by various machine learning modules using thermodynamic and configurational parameters, *Metals and Materials International*. 2023, 29(1) 38-52.
- [5] Garcia Filho F.D.C, Ritchie R.O., Meyers M.A., Monteiro S.N., Cantor-derived medium-entropy alloys: bridging the gap between traditional metallic and high-entropy alloys. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 17, 1868-1895.
- [6] Muangtong P., Rodchanarowan A., Chaysuwan D., Chanlek N., Goodall R. The corrosion behaviour of CoCrFeNi-x (x = Cu, Al, Sn) high entropy alloy systems in chloride solution. *Corrosion Science*, 2020, 172, 108-740.
- [7] Lu Q., Chen X., Tian W., Wang H., Liu P., Zhou H., et al. Corrosion behavior of a non-equiatomic CoCrFeNiTi high-entropy alloy: A comparison with 304 stainless steel in simulated body fluids, *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 897, 163-036.
- [8] Zhang Z, Ling Y, Hui J, Yang F, Zhang X, Tan S, et al. Effect of C additions to the microstructure and wear behaviour of CoCrFeNi high-entropy alloy, *Wear*, 2023, 15.530-531.
- [9] Wang Y.P., Li B.S., Ren M.X., Yang C., Fu H.Z., Microstructure and compressive properties of AlCrFeCoNi high entropy alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 2008, 491(1-2) 154-158.
- [10] Kaya F., Yetiş M., Selimoğlu G.İ., Derin B., Influence of Co content on microstructure and hardness of AlCo<sub>x</sub>CrFeNi (0 ≤ x ≤ 1) high-entropy alloys produced by self-propagating high-temperature synthesis, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2022, 27, 101-003.
- [11] Zhang KB, Fu ZY, Zhang JY, Wang WM, Wang H, Wang YC, et al. Microstructure and mechanical properties of CoCrFeNiTiAl<sub>x</sub> high-entropy alloys. *Materials Science and Engineering: A*.2009, 508(1-2) 214-219.
- [12] Dong Y, Lu Y, Kong J, Zhang J, Li T. Microstructure and mechanical properties of multi-component AlCrFeNiMo<sub>x</sub> high-entropy alloys. *Journal of alloys and compounds*.2013. 573.96-101.
- [13] Wang Z.Q., Shi Y., Wang X.R., Microstructure, thermodynamics and compressive properties of Al<sub>0.5</sub>CoCrCuFeNi-X (X=V,Si,VSi) high-entropy alloys. *Materials Science and Technology*, 2022, 38(18) 1555-1562.
- [14] Xiao D.H., Zhou P.F., Wu W.Q., Diao H.Y., Gao M.C., Song M., et al. Microstructure, mechanical and corrosion behaviors of AlCoCuFeNi-(Cr,Ti) high entropy alloys, *Materials & Design*, 2017, 116, 438-447.
- [15] Xu QL, Liu KC, Wang KY, Lou LY, Zhang Y, Li CJ, et al., TGO and Al diffusion behavior of CuAl<sub>x</sub>NiCrFe high-entropy alloys fabricated by high-speed laser cladding for TBC bond coats, *Corrosion Science*, 2021, 192, 109781.

جدول ۷- نتایج آنالیز سختی‌سنجی آلیاژ انتروپی بالا CuAlNiCrFe

| سختی HV30 |         |         |         | عناصر       |
|-----------|---------|---------|---------|-------------|
| ۱۰۶۰      |         |         |         | کروم Cr     |
| ۱۶۷       |         |         |         | آلومینیم Al |
| ۶۰۸       |         |         |         | آهن Fe      |
| ۶۳۸       |         |         |         | نیکل Ni     |
| ۳۶۹       |         |         |         | مس Cu       |
| ۵۶۰       |         |         |         | سختی تئوری  |
| انحراف    | نمونه ۳ | نمونه ۲ | نمونه ۱ | سختی HV30   |
| ± ۳       | ۵۶۵     | ۵۹۰     | ۵۷۷     |             |



شکل ۷- نتیجه آزمون کشش (مهندسی) آلیاژ انتروپی بالا CuAlNiCrFe

## ۴- نتیجه‌گیری

- (۱) جدایش مس به دلیل انجماد سریع ناشی از روش VAR مشاهده نشد.
- (۲) تصاویر متالوگرافی و نتایج آنالیز EDS ساختار دو فازی غنی از مس و غنی از آهن را نشان داد.
- (۳) نتیجه بدست‌آمده از پراش اشعه ایکس فاز غنی از مس را FCC و فاز غنی از آهن را BCC نشان داد.
- (۴) نتایج آنالیز حرارتی نشان داد که دمای شروع استحاله از ۹۵۷ به صورت گرماگیر آغاز شده و نقطه ذوب این آلیاژ در دمای ۱۳۶۰ °C است.
- (۵) نتایج حاصل از آزمون‌های مکانیکی شامل آزمون کشش (استحکام نهایی و درصد ازدیاد طول)، میکروسختی فازهای دندربیتی و زمینه و میانگین سختی آلیاژ به ترتیب ۳۰۰۰، ۱۶۰، ۳/۵ و ۱۲۵ و ۵۷۷ ویکرز شد.

- [16] ناصرزشگی ح.، کیانی رشید ع.ر.، وحدتی خاکی ج.، طراحی آلیاژهای دیرگداز آنتروپی بالا با هدف کاهش وزن و هزینه، پژوهشنامه ریخته‌گری، ۱۳۹۹، ۴(۳) ۱۷۳-۱۷۶.
- [17] صالحی م.، کاشانی ثانی س.، بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ Al ۵۰۸۳ تولید شده به روش انجماد سریع. پژوهشنامه ریخته‌گری، ۱۴۰۰، ۵(۱) ۸-۱.
- [18] Arun S., Radhika N., Saleh B., Advances in vacuum arc melting for high entropy alloys: A review, *Vacuum. Elsevier Ltd.*, 2024, 20, 113314.
- [19] Mohammadzadeh A., De Nardi A., Omidbakhsh F., Garbiec D., Fardan A., Hryha E., et al., A novel alloy design approach in developing CoNi-based high entropy superalloy using high entropy alloys thermodynamic and spark plasma sintering, *Materials Science and Engineering: A*, 2024, 17, 146841.
- [20] Bencze L., Hasemann G., Sergeev D., Motalov V., Müller M., Krüger M., Thermodynamic properties of refractory Mo-Nb-V-Ti high entropy alloys (HEAs), *Journal of Alloys and Compounds*, 2024, 976, 173279.
- [21] Thirugnanasambantham K.G., Kishan S.N., Sree R.A., Singh A., Boddu T., Avinash K., et al. Phase predictions via thermodynamic parameter ( $\Omega$ ) vs enthalpy mix ( $\Delta H_{mix}$ ) for (Cr-Fe-Ni-Ti-Nb) high-entropy alloy, *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 2023, 10, 1-9.
- [22] Zamani M.R., Mirzadeh H., Malekan M., Weißensteiner I., Roostaei M., Unveiling the strengthening mechanisms of as-cast micro-alloyed CrMnFeCoNi high-entropy alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 2023, 957, 170443.
- [23] Abbasi S.M., Seifollahi M., Yousefi E., Microstructural Investigation of the cast and homogenized Al10Co25Cr8Fe15Ni36Ti6 high entropy alloy. *Journal of Advanced Materials and Technologies*. 2024, 13(1) 46-56.
- [24] Mamnooni S., Borhani E., Heydari H., Solid-solution phase formation rules for high entropy alloys. A thermodynamic perspective, *Synthesis and Sintering*. 2024, 4(1) 65-78.



IRANIAN FOUNDRYMEN'S  
SOCIETY

## Founding Research Journal

*Research Paper:*

### Investigating the Microstructure, Mechanical and Thermal Properties of CuNiAlCrFe High Entropy Alloy Made by VAR Method

Haniyeh Nahavandi <sup>1</sup>, Hamid Khorsand <sup>2\*</sup>

1. M.Sc. Student, Department of Materials Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

2. Associate Professor, Department of Materials Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

\* Corresponding author: hkhorsand@kntu.ac.ir

#### Paper history:

Receive Date: 27 June 2024  
Revise Date: 17 August 2024  
Accept Date: 25 August 2024

#### Keywords:

High entropy,  
CuNiAlCrFe alloy  
Fast solidification,  
Microstructure  
Mechanical properties,

#### Abstract:

High entropy alloys (HEAs) have attracted much attention due to their unique properties, which include high mechanical strength, corrosion resistance, and stability at high temperatures. Among the production methods of high entropy alloys, the vacuum remelting casting method (VAR) is of great importance due to the control of the melting process and rapid solidification of the melt. The aim of this research is to make a microstructure with uniform chemical composition of high entropy CuNiAlCrFe alloy with suitable mechanical and thermal properties using VAR casting method. After preparing CuNiAlCrFe high entropy alloy ingot by VAR casting method, XRD, EDX analyzes and also Map images of the alloy composition were prepared to verify the made alloy. The light microscope images showed the dendritic structure of the alloy due to rapid freezing and confirmed the biphasic nature of the high entropy alloy. Next, in order to characterize the physical properties of the high entropy alloy, DSC and TG thermal analysis were taken. The results of thermal analysis showed that the melting point of the high entropy CuNiAlCrFe alloy is 1360 oC, and no mass change was observed during the process up to the above temperature. During the process of studying the above-mentioned high entropy alloy, samples were taken to check mechanical tests such as tensile, average hardness and microhardness, and the results obtained were final strength 3000 MPa, HV30577, (rich in iron phase) HV30 160 and (copper rich phase) were 125 HV30

#### Please cite this article using:

Haniyeh Nahavandi, Hamid Khorsand, Investigating the microstructure, mechanical and thermal properties of CuNiAlCrFe high entropy alloy made by VAR method, in Persian, Founding Research Journal, 2024, 8(2) 107-115.

DOI: 10.22034/frj.2024.465005.1196

Journal homepage: [www.foundingjournal.ir](http://www.foundingjournal.ir)