



Original Research Article - Extended Abstract

Microstructural Investigation Of The Cast And Homogenized $\text{Al}_{10}\text{Co}_{25}\text{Cr}_8\text{Fe}_{15}\text{Ni}_{36}\text{Ti}_6$ High Entropy Alloy

Seyed Mahdi Abbasi ¹, Masumeh Seifollahi ^{2*}, Ebrahim Yousefi ³,

¹Professor, Faculty of Materials & Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

²Assistant Professor, Faculty of Materials & Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

³Researcher, Faculty of Materials & Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

*Corresponding Author's Email: m_seifollahi@mut.ac.ir (Masumeh seifollahi)

Paper History:

Received:

Revised in revised form:
Scientific Accepted:

Keywords:

High Entropy Alloys,
 $\text{Al}_{10}\text{Co}_{25}\text{Cr}_8\text{Fe}_{15}\text{Ni}_{36}\text{Ti}_6$,
Microstructure,
Homogenization

ABSTRACT

The as-cast and homogenized microstructures of $\text{Al}_{10}\text{Co}_{25}\text{Cr}_8\text{Fe}_{15}\text{Ni}_{36}\text{Ti}_6$ high entropy alloy were investigated in this study. To this end, the high entropy alloy was produced using vacuum induction melting and electro slag remelting processes, and the ESRed block was homogenized at the temperature of 1220 °C for 17 hr. The as-cast, as ESRed and homogenized microstructures were then investigated using optical microscopy, scanning electron microscopy, and X-ray diffraction. On the basis of theoretical measurements, the mixing entropy, atomic size differences, and Valence electron concentration were obtained as 13.05 kJ/mol, 8.8, and 7.97, respectively. These values can predict the formation of a solid solution matrix as the type of BCC + FCC and intermetallic phases. The as-cast microstructure included $\gamma + \gamma'$ in the dendritic zones and $\gamma' + \text{NiAl}$ in the interdendritic areas. After homogenization, the dendritic structures were almost eliminated, and they became discontinuous which is an indication of elements distribution homogenization. NiAl phase was also omitted after the homogenization process.



<https://doi.org/10.30501/jamt.2023.376241.1259>
https://www.jamt.ir/article_166008.html

URL:

1. INTRODUCTION

The high entropy alloys are known as solid solution alloys that contain 5-13 elements with the same or almost the same atomic percentage (5-35%). Owing to their high entropy, solid solutions with several elements tend to be stable at high temperatures. These alloys are characterized by low diffusion rate, thus causing the formation of nanometer precipitates and severe lattice distortion

due to the difference in atomic radii ([Takeuchi et al., 2014](#)) ([Ma et al., 2023](#)).

AlCoCrFeNi high entropy alloys have a variety of eutectic microstructures including FCC and BCC phases. Due to the presence of five elements, this alloy is extremely non-uniform with dendritic structure. Therefore, it requires high-temperature homogenization, which in turn reduces the amount of segregation to a desirable extent and eliminates

the dendritic structure ([Zeng et al., 2023](#)) ([Munitz et al., 2016](#)).

Heat treatment process is an integral part of the industrial production components. New studies ([Yuan et al., 2023](#)) ([Shen et al., 2023](#)) ([Shi et al., 2018](#)) on high entropy alloys also confirmed the need for further research in this field. Munitz et al. ([Munitz et al., 2016](#)) assessed the effects of homogenizing temperatures on the microstructure of AlCoCrFeNi high entropy alloy. They found that at 1200 °C for 3 hours, nano phases were precipitated which increased the elongation of the alloy. Ghaderi et al. ([Ghaderi et al., 2019](#)) revealed that Al0.5CoCrFeNi alloy had an FCC dendritic structure with droplet BCC phase. The BCC phases increased at 1100 °C in 24 hours of homogenization. In addition, two other types of nodular phase were also nucleated.

Homogenization provides the desired microstructure for the annealing process, and the subsequent aging leads to the development of the service operation. The present study investigated the microstructure of Al₁₀Co₂₅Cr₈Fe₁₅Ni₃₆Ti₆ alloy.

2. METHOD

Al0.7CoCrFeNi alloy was melted in a Vacuum Induction Melting (VIM) furnace under a vacuum of 5×10^{-4} Pa. The chemical composition of the alloy was measured using EDS (MIRA3 type) analysis, the results of which are summarized in Table 1. The alloy was subjected to homogenization at 1220 °C for 17 hr, cooled down in the furnace to 950 °C, and then quenched in the air. In order to study the microstructure, the samples were polished and etched in 10ml HCl+10ml HNO₃ + 10ml H₂O solution. The microstructure was then examined through Olympus optical microscope and MIRA3 scanning electron microscopy equipped with EDS analysis.

3. FINDINGS AND ARGUMENT

3-1. Empirical approaches

To apply Hume-Rothery rules concepts to predict SS phase formation in complex alloys, the HEA community has developed composition-weighted terms for differences in atom radii (dr) and electronegativity (dc) and for an average Valence Electron Concentration (VEC). Thermodynamic considerations are reflected through ΔS_{mix} . Through the following equations, the values for these parameters of the alloy can be obtained:

$$\Delta S_{mix} = -R \sum_{i=1}^n C_i \ln C_i$$

$$\Delta S_{mix} = -8.314 (0.109 \ln 0.109 + 0.245 \ln 0.245 + 0.076 \ln 0.076 + 0.147 \ln 0.147 + 0.36 \ln 0.36 + 0.06 \ln 0.06) = 13.05 \frac{kJ/mol}{mol}$$

$$VEC = \sum_{i=1}^n C_i (VEC) i$$

$$VEC = 0.109 \times 3 + 0.245 \times 9 + 0.076 \times 6 + 0.147 \times 8 + 0.36 \times 10 + 0.06 \times 4 = 7.97$$

$$\delta = 100 \sqrt{\sum_{i=1}^n C_i (1 - \frac{r_i}{r})^2}$$

$$r = \sum_{i=1}^n C_i r_i = 1.5$$

$$\delta = 100 \sqrt{\sum_{i=1}^n C_i (1 - \frac{r_i}{r})^2} = 100 \left[0.109(1 - \frac{1.18}{1.5})^2 + 0.245(1 - \frac{1.52}{1.5})^2 + 0.076(1 - \frac{1.66}{1.5})^2 + 0.147(1 - \frac{1.56}{1.5})^2 + 0.36(1 - \frac{1.49}{1.5})^2 + 0.06(1 - \frac{1.76}{1.5})^2 \right] = 8.8$$

Based on the above calculations, the obtained alloy proved to be a high entropy alloy with FCC+BCC solid solutions. Since $\delta = 8.8$, the formation of intermetallic phases like NiAl is probable.

3-2. As Cast microstructure

Figure 1 shows the dendritic microstructure of the Al₁₀Co₂₅Cr₈Fe₁₅Ni₃₆Ti₆ cast alloy. The alloy has rough continuous dendrite after VIM and fine one after VAR process.

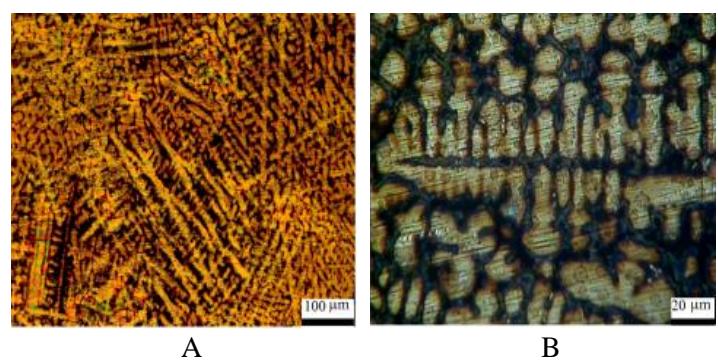


Figure 1. OM microstructure of Al₁₀Co₂₅Cr₈Fe₁₅Ni₃₆Ti₆ cast alloy after a) VIM and b) VAR

One of the characteristics of the cast alloy is the local segregation as a result of none equilibrium solidification. Figure 2 shows the elemental distribution of the alloys. This figure shows the Al, Ni, and Ti segregation in the interdendritic and Fe, Cr, and Co segregation in the dendritic regions.

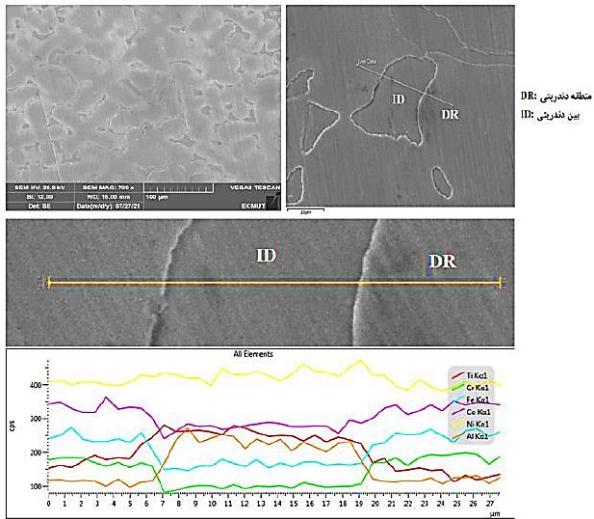


Figure 2. SEM micrograph and line scan elemental analysis of $\text{Al}_{10}\text{Co}_{25}\text{Cr}_8\text{Fe}_{15}\text{Ni}_{36}\text{Ti}_6$ cast alloy

Declining or deleting segregation that provides diffusion condition during homogenization process is required.

3-3. As homogenized microstructure

After homogenizing heat treatment, the amount of interdendritic phases decreased as a result of Al diffusion from dark to bright region and Fe, Co and Cr diffusin from bright to dark one. The elemental homogenization distribution is shown in Figure 4. Microstructural investigation shows that γ' precipitations is also formed during homogenization with the size of 273 nm and 39% volume fraction (Figure 4). According to the phase diagram, when the alloy cools down in the furnace, the γ' phase is precipitated below 1000 °C. The XRD analysis of the alloy under both as-cast and homogenized condition proves the formation of γ' and NiAl. NiAl is almost deleted after homogenizing (Figure 5).

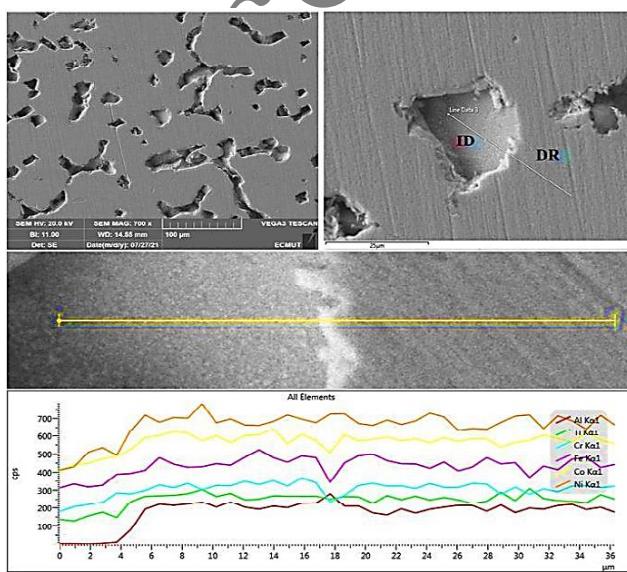


Figure 3. SEM micrograph and line scan elemental analysis of $\text{Al}_{10}\text{Co}_{25}\text{Cr}_8\text{Fe}_{15}\text{Ni}_{36}\text{Ti}_6$ homogenized alloy at 1220 °C for 17 hr

4. CONCLUSION AND SUGGESTIONS

$\text{Al}_{10}\text{Co}_{25}\text{Cr}_8\text{Fe}_{15}\text{Ni}_{36}\text{Ti}_6$ alloy with the entropy of 13.05 kJ/mol is the high entropy alloy with FCC+BCC solid solutions. Since $\delta = 8.8$, the formation of intermetallic phases like NiAl is probabl.

The cast alloy is composed of Fe, Co, Cr rich dendritic and Ni, Ti, Al rich interdendritic region. The NiAl and γ' phases were formed in the matrix.

Homogenizing occurred at 1220 °C, dissolved NiAl, and diminished the dendritic structure as a result of Ti, Ni, Al diffusion into the dendritic region and Fe, Co, Cr into interdendritic region.

5. ACKNOWLEDGEMENT

This project was supported by The Metallic Materials Research Center of MUT. The authors would like to acknowledge the support of melting laboratory.

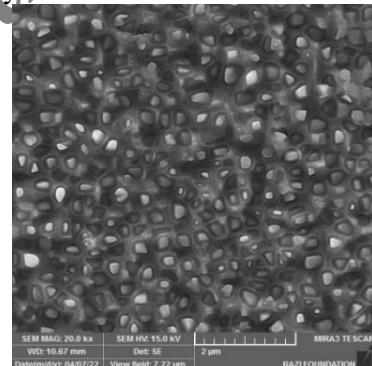


Figure 4. FE-SEM micrograph of γ' phases after homogenizing at 1220 °C for 17 hr

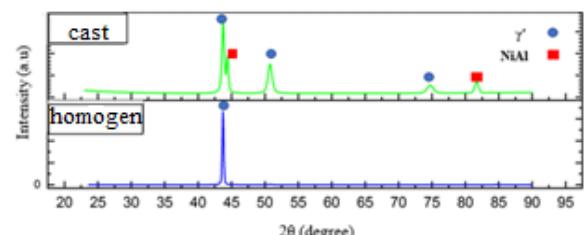


Figure 5. XRD pattern of $\text{Al}_{10}\text{Co}_{25}\text{Cr}_8\text{Fe}_{15}\text{Ni}_{36}\text{Ti}_6$.

REFERENCES

- A.Ghaderi, H. moghni alghlandis, M. Soltani nejad, A. Abbasi, K. Dehghani (2019). Effect of annealing an microstructure and hardness of 10.5CoCrFeNi high entropy alloy. *8th imat*. Tehran: civilika. in persian.

- Ma, L., Wan, J., Lai, Z., Wu, Z., Yang, B., & Zhao, P. (2023). Microstructure and mechanical property of Al56-xCo24Cr20Nix eutectic high-entropy alloys with an ordered FCC/BCT phase structure. *Journal of Alloys and Compounds*, 936, 168-194.
- Munitz A, Salhov S, Hayun S, Frage N. (2016). Heat treatment impacts the microstructure and mechanical properties of AlCoCrFeNi high entropy alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 683, 221-230.
- Shen Q, Huang D, Li F, Liu M, Wang X. (2023). Microstructures and mechanical properties of the precipitation strengthened Al0.4Cr0.7FexNi2V0.2 high entropy alloys. *Materials Science and Engineering A*, 864, 144606.
- Shi Y, Collins L, Feng R, Zhang C, Balke N, Liaw P K, Yang B. (2018). Homogenization of Al_xCoCrFeNi high-entropy alloys with improved corrosion resistance. *Corrosion Science*, 133, 120-131.
- Takeuchi A, Amiya K, Wada T, Yubuta K, Zhang W. (2014). High-entropy alloys with a hexagonal close-packed structure designed by equi-atomic alloy strategy and binary phase diagrams. *Journal of Materials*, 66(10), 1984-1992.
- Yuan J, Zhang H, Wang Z, Han P, Qiao J. (2023). Contribution of coherent precipitates on mechanical properties of CoCrFeNiTi0.2 high-entropy alloy at room and cryogenic temperatures. *Intermetallics*, 154, 107-820.
- Zeng X, Li F, Zhou X, Yan W, Li J, Dongye Yang D, Shen Q, Wang X, Liu M. (2023). The phase stability at intermediate-temperature and mechanical behavior of the dual-phase AlCoCr0.5FexNi2.5 high entropy alloys. *Materials Chemistry and Physics*, 297, 127314.



مقاله کامل پژوهشی

ارزیابی ریزساختار آلیاژ آنتروپی بالای Al₁₀Co₂₅Cr₈Fe₁₅Ni₃₆Ti₆ در حالت ریختگی و همگن شده

سید مهدی عباسی^۱، معصومه سیف‌اللهی^{۲*}، ابراهیم یوسفی^۳

^۱ استاد، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوریهای ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

^۲ استادیار، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوریهای ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

^۳ محقق، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوریهای ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

چکیده

هدف از این پژوهش ارزیابی ساختار ریختگی و همگن شده آلیاژ آنتروپی بالای Al₁₀Co₂₅Cr₈Fe₁₅Ni₃₆Ti₆ است. در این پژوهش، ریزساختار آلیاژ پس از ریختگری در کوره ذوب القایی تحت خلا و کوره ذوب مجدد قوسی و همچنین پس از همگن‌سازی در دمای ۱۲۲۰ درجه سلسیوس به مدت ۱۷ ساعت بررسی شده است. ریزساختار نمونه‌ها توسط میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ الکترونی روبشی و پراش پرتو ایکس ارزیابی شد. براساس محاسبات، مقدار آنتروپی اختلاط آلیاژ $kJ/mol = 13/0.5 = 8/8 = 8/0.7 = 7/0.97 = VEC$ است که پیش‌بینی می‌شود ساختار این آلیاژ شامل فازهای محلول جامد FCC و BCC و فازهای میانی باشد. در حالت ریختگی، ساختار در نواحی دندربینی منتشر از زمینه γ و رسوبات α و نواحی بین‌دندربینی شامل رسوبات γ و فاز NiAl است. پس از انجام عملیات حرارتی همگن‌سازی، دندربینی‌ها تا حدی حذف شده‌اند و از پیوستگی آن‌ها کاسته شده است که این مسئله به معنای یکنواخت‌تر شدن توزیع عناصر است. همچنین، پس از همگن‌سازی، فاز NiAl نیز از ساختار حذف شده است.

doi: <https://doi.org/10.30501/jamt.2021.?????.????>
http://www.jamt.ir/article_?????.html

URL:

آلیاژ‌ها بسیار کمتر از تعداد پیش‌بینی شده از قانون فازی کلیس است. مخلوطشدن چند عنصر اصلی در آلیاژ‌های آنتروپی بالا آثاری از جمله اثر کوکتیل، اثر آنتروپی بالا، اعوجاج شدید در شبکه و نفوذ گند را خواهد داشت و درمجموع تمايل به حلاليت و تشکيل فازهای محلول جامد را افزایش می‌دهد و از تشکيل تعداد زياد فازها جلوگيری می‌کند ([Zhang et al., 2014](#))

۱- مقدمه

آلیاژ‌های آنتروپی بالا معمولاً پنج عنصر فلزی گوناگون با نسبت اتمی برابر یا تقریباً برابر دارند که اغلب دارای ساختارهای بلوری BCC یا FCC هستند ([Ma et al., 2023; Takeuchi et al., 2014](#))

بسیاری از آلیاژ‌های آنتروپی بالا محلولی جامد را تشکيل می‌دهند و تعداد فازهای مشاهده شده در این

*عهددار مکاتبات

نشانی: ایران، تهران، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوریهای ساخت، تلفن: ۰۲۱-۲۲۹۳۵۱۴۱، دورنگار:

22935341-021

m_seifollahi@mut.ac.ir پیامنگار:

Please cite this article as: First Author Name, Second Author Name, Third Author Name, "English Title", *Journal of Advanced Materials and Technologies*, Vol. ?, No. ?, (2021), ??-?. <https://doi.org/10.30501/jamt.2021.?????.????>



و گزارش کردند که آلیاژ مذکور در حالت ریختگی دارای ساختار دندریت ستونی و فاز زمینه FCC و یک فاز قطره‌ای با ساختار شبکه BCC است که پس از همگن‌سازی در دمای ۱۱۰۰ درجه سلسیوس بهمدت ۲۴ ساعت شاهد افزایش فاز قطره‌ای و جوانهرنی دو فاز سوزنی‌شکل با ترکیبات شیمیایی متفاوت است (Ghaderi et al., 2019). با توجه به موارد بیان شده، اطلاعات پراکنده‌ای درخصوص شرایط همگن‌سازی در مقالات ارائه شده است و لذا برای آلیاژ ریخته‌گری شده در این پژوهش نمی‌توان بهطور قطع از این نتایج استفاده کرد و نیاز است قبل از پیرسازی حتماً همگن‌سازی آلیاژ ارزیابی شود.

سیستم آلیاژی $\text{Al}_{10}\text{Co}_{25}\text{Cr}_8\text{Fe}_{15}\text{Ni}_{36}\text{Ti}_6$ داشتن رسوبات γ در زمینه γ، خواص کششی دمای بالای خوبی از خود نشان داده است. بیشتر مطالعات انجام شده به تأثیر عناصر آلیاژی در ریزساختار و خواص این آلیاژ پرداخته‌اند و تحقیقات کمی پیرامون عملیات حرارتی همگن‌سازی و پیرسازی این آلیاژ انحصاری شده است. دستیابی به ساختار مطلوب پس از ریخته‌گری و پیش از پیرسازی از ضروریات دستیابی به خواص بهینه است که در هر آلیاژی باید بهینه شود. این موضوع مبنای این پژوهش برای استفاده از این نتایج در مراحل بعدی قرار گرفت.

2- روش تحقیق

آلیاژ آنتروپی بالای $\text{Al}_{10}\text{Co}_{25}\text{Cr}_8\text{Fe}_{15}\text{Ni}_{36}\text{Ti}_6$ از عناصر تشکیل‌دهنده با خلوص بالای ۹۹/۵ درصد در کوره ذوب ریختگی و بهبود همگنی ساختار و کاهش رفع عیوب ریختگی، آلیاژ تحت عملیات ذوب مجدد قرار گرفت. ظرفیت کوره ۱۶ VIM کیلوگرم و توان آن ۳۰ کیلووات و دارای یوتنه الومینیمی و قالب گرافیتی با خلاً اولیه کوره $10^{-4} \times 10^5$ میلی متر بود. عملیات ذوب مجدد در کوره ذوب مجدد قوسی تحت خلاً با شدت جریان ۳۵۰۰ آمپر و ولتاژ ۳۱-۳۱ ولت با قالب استوانه‌ای مسی انجام شد. ابعاد شمش حاصل از فرایند ذوب مجدد با قطر ۱۲ و طول ۲۵ سانتی‌متر به دست آمد.

ترکیب شیمیایی آلیاژ آنتروپی بالای $\text{Al}_{10}\text{Co}_{25}\text{Cr}_8\text{Fe}_{15}\text{Ni}_{36}\text{Ti}_6$ با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل MIRA3 و بهمکم آنالیزگر EDS اندازه‌گیری شد که نتایج آن در جدول ۱ ارائه شده است. جدول ۱. مقایسه ترکیب اسمی آلیاژ با ترکیب شمش تولیدشده

عنصر آلیاژی						
Ti	Ni	Fe	Cr	Co	Al	
۵/۳	۱/۳۹	۱/۵	۷/۷	۳/۲۷	۵	ترکیب اسمی (درصد وزنی)

سه عامل اندازه اتمی (δ)، آنتالپی اختلاط (ΔH_{mix}) و آنتروپی اختلاط (ΔS_{mix}) عوامل مؤثر در تشکیل محلول جامد در آلیاژ‌های آنتروپی بالا عنوان شده‌اند. محلول جامد زمانی تشکیل خواهد شد که $6/6 \leq \frac{\Delta S_{mix}}{KJ/mol} \leq \frac{19/5}{K.mol}$ و $\frac{J}{K.mol} \leq -5$ باشد. علاوه بر این، پارامتر دیگری که به پیش‌بینی ساختار بلورنگاری (کریستالوگرافی) کمک می‌کند غلظت الکترون ظرفیت^۱ یا VEC است. الکترونی است که در تشکیل پیوند شیمیایی شرکت می‌کند و در ساختار و خصوصیات آلیاژ‌های آنتروپی بالا تاثیرگذار است. با VEC معادل، پایداری فاز BCC و FCC در آلیاژ‌های آنتروپی بالا را می‌توان پیش‌بینی کرد (Guo et al., 2023; Zhang & Fu, 2012).

عموماً ریزساختار آلیاژ‌های آنتروپی بالا شامل نواحی دندریتی و بین‌دندریتی است. رسوبات صفحه‌ای یا کروی‌شکل و فاز‌های نانوسلختار اغلب در نواحی دندریتی یافت می‌شوند. ارجمله ویژگی‌های آلیاژ‌های ریختگی، ساختار شاخه‌ای و جدایش موضعی و غیریکنواختی در ترکیب شیمیایی آن‌ها است. این پدیده‌ها که ناشی از غیرتعادلی سردشدن در ضمن انجماد و عدم‌فروز کامل عناصر آلیاژی هستند باعث افت خواص مکانیکی آلیاژ از جمله قابلیت کار گرم یا سرد و همچنین کاهش کیفیت و کارایی عملیات حرارتی کوناگون می‌شوند. از این‌رو، ساختار و ترکیب شیمیایی آلیاژ‌های ریختگی باید، بهمکم عملیات حرارتی مناسب، همگن یا یکنواخت شوند (Munitz et al., 2016; Zeng et al., 2016; et al., 2023).

عملیات حرارتی در آلیاژ AlCoCrFeNi علاوه بر تنظیم نسبت فاز‌های FCC و BCC به انحلال فاز‌های مضر و ایجاد نانورسوبات و بهبود خواص مکانیکی Yuan et al., 2023; Asgarkhani et al., 2023 منجر می‌شود (Shi et al., 2018; Shen et al., 2023).

شی و همکاران (2018) دریافتند که همگن‌سازی در دمای ۱۲۵۰ درجه سلسیوس بهمدت 1000 ساعت موجب تغییرات چشمگیر در ریزساختار، افزایش اندازه دانه و بهبود مقاومت به خوردگی آلیاژ $\text{Al}_{0.7}\text{CoCrFeNi}$ می‌شود (Shi et al., 2018). همچنین، در تحقیقی دیگر مونتیز و همکاران (2016) اثر همگن‌سازی را در آلیاژ آنتروپی بالای AlCoCrFeNi در دمای ۱۲۰۰ درجه سلسیوس بهمدت 3 ساعت بررسی کردند که از نتایج آن ایجاد رسوبات نانومتری، افزایش شکل‌پذیری و افزایش سختی بود؛ آن‌ها گزارش کردند که با افزایش دما تا ۱۲۷۵ درجه سلسیوس اکثر فاز‌های موجود حل شده‌اند (Munitz et al., 2016). در تحقیقی دیگر، قادری و همکاران (2019) تأثیر همگن‌سازی را در ریزساختار و سختی آلیاژ آنتروپی بالای $\text{Al}_{0.5}\text{CoCrFeNi}$ بررسی

مقادیر VEC عناصر در جدول 2 ارائه شده و طبق رابطه 2 محاسبه شده است.

$$VEC = 0.109 \times 3 + 0.245 \times 9 + 0.076 \times 6 + 0.147 \times 8 + 0.36 \times 10 + 0.06 \times 4 = 7.97$$

با VEC معادل، پایداری فاز های BCC و FCC در آلیاژ های آنتروپی بالا می توان پیش بینی کرد. برای آلیاژ های آنتروپی بالا با VEC بزرگتر از 8 فقط فاز FCC وجود دارد. در مقابل، در آلیاژ های آنتروپی بالا با VEC کمتر از 6/87 فاز غالب، فاز BCC است. اما، VEC در فاصله 6/87 تا 8 قرار داشته باشد، زمانی که VEC در فاصله 6/87 تا 8 می شود که ساختار شامل فاز های FCC و BCC باشد.

تفاوت در شعاع اتمی (δ) یکی دیگر از معیار های ارزیابی آلیاژ های آنتروپی بالا است که به صورت رابطه 3 محاسبه می شود:

$$\delta = 100 \sqrt{\sum_{i=1}^n C_i (1 - r_i/r)^2} \quad (3)$$

مقدار r از رابطه 4 محاسبه می شود:

$$r = \sum_{i=1}^n C_i r_i = 1.5 \quad (4)$$

$$\delta = 100 \sqrt{\sum_{i=1}^n C_i (1 - r_i/r)^2} = 100 \left[0.109(1 - \frac{1.18}{1.5})^2 + 0.245(1 - \frac{1.52}{1.5})^2 + 0.076(1 - \frac{1.66}{1.5})^2 + 0.147(1 - \frac{1.56}{1.5})^2 + 0.36(1 - \frac{1.49}{1.5})^2 + 0.06(1 - \frac{1.76}{1.5})^2 \right] = 8.8$$

جدول 2. شعاع اتمی و غلظت الکترون های لایه ظرفیت عناصر تشکیل دهنده آلیاژ $Al_{10}Co_{25}Cr_8Fe_{15}Ni_{36}Ti_6$ در پژوهش حاضر

Ti	Ni	Fe	Cr	Co	Al	عنصر
1/76	1/49	1/56	1/66	1/52	1/18	r (A°)
4	10	8	6	9	3	VEC

در نتیجه، مقدار 8 برابر خواهد بود با 8/8 که در مقادیر کمتر 6/6 احتمال تشکیل فاز های بین فازی در آلیاژ آنتروپی بالا وجود ندارد و در مقادیر بیش از آن احتمال تشکیل فاز بین فازی وجود دارد ([Zhang & Fu, 2012](#)).

با توجه به محاسبات انجام شده، آلیاژ $Al_{10}Co_{25}Cr_8Fe_{15}Ni_{36}Ti_6$ اختلاط 13/05 کیلوگرم بر مول در دسته آلیاژ های آنتروپی بالا قرار دارد و به دلیل داشتن 8/8 احتمال

نتایج EDS (درصد اتمی)						
6	3	1	8	2	10	
/3 5	/4 39	/3 1	/3 7	/9 2	/4 5	

نتایج EDS (درصد وزنی)						
6	3	1	7	2	10	
6	6	1	7	2	10	

آلیاژ در دمای 1220 درجه سلسیوس به مدت 17 ساعت همگن شد. برای جلوگیری از ایجاد ترک در مرزدانه ها، شمش تا دمای 950 درجه سلسیوس با نرخ 0/08 °C/s در گوره و سپس در هوا تا دمای محیط سرد شد.

به منظور بررسی های ریز ساختاری از میکروسکوپ نوری OLYMPUS و میکروسکوپ الکترونی روبشی MIRA3 مجهز به آنالیز عنصری EDS استفاده شد. نمونه ها برای بررسی های ریز ساختاری، پس از آماده سازی سطحی (سنبدامنی و پولیش نمونه ها)، در محلول $HCl + HNO_3 + H_2O$ به نسبت های برابر به مدت زمان 3 دقیقه اج شدند. به منظور تعیین قطر و کسر حجمی رسوبات از ImageJ و همچنین به منظور فازیابی از دستگاه پراش پرتو ایکس، ASENWARE مدل AW-XDM300 با تابش CuKa طول موج $\lambda = 1/54$ استفاده شد. همچنین، برای تحلیل داده های آنالیز پراش پرتو ایکس از نرم افزار Xpert HighScore Ver.3 استفاده شد.

3- نتایج و بحث

3.1. بررسی معیار های تشکیل آلیاژ آنتروپی بالا

در این بخش، معیار های امکان سنجی تشکیل آلیاژ آنتروپی بالا برای آلیاژ تولیدی در این پژوهش با ترکیب جدول 1 ارزیابی می شود. C_i و r_i به ترتیب درصد اتمی و شعاع اتمی عنصر i هستند.

آنترپوپی اختلاط (ΔS_{mix}) از رابطه 1 محاسبه می شود:

$$\Delta S_{mix} = -R \sum_{i=1}^n C_i \ln C_i \quad (1)$$

$$\Delta S_{mix} = -8.314 (0.109 \ln 0.109 + 0.245 \ln 0.245 + 0.076 \ln 0.076 + 0.147 \ln 0.147 + 0.36 \ln 0.36 + 0.06 \ln 0.06) = 13.05 \frac{kJ/mol}{mol}$$

محده آنترپوپی اختلاط برای آلیاژ های آنتروپی بالا 11 تا $\frac{J}{K.mol}$ است. مقدار آنترپوپی اختلاط محاسبه شده برای آلیاژ حاضر در محدوده مقدار بیان شده برای تشکیل آلیاژ آنتروپی بالا قرار دارد.

غلظت الکترون های لایه ظرفیت (VEC) از رابطه 2 محاسبه می شود:

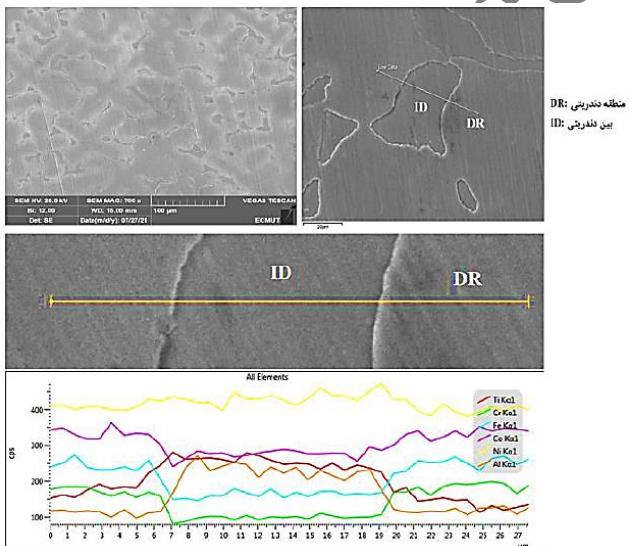
$$VEC = \sum_{i=1}^n C_i (VEC) i \quad (2)$$

و بین‌دندريتي بهوضوح مشخص هستند و نتایج حاصل از تصاویر نوری را تأييد می‌کنند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با شروع آناليز در ناحيه بین‌دندريتي، مقدار آهن، كروم و كبات كاهش پيدا كرده و مقدار الومينيم و تيتانيوم افزاييش يافته است.

تحقيق حاضر اين پيش‌بياني را كه نواحي بین‌دندريتي باید غني از عناصر با دمای ذوب کمتر و عناصر سبک‌تر باشند تأييد می‌کند. مناطق بین‌دندريتي و دندريتي بهترتب غني از الومينيم، نيكل و تيتانيوم و غني از آهن، كروم و كبات هستند. عناصر با نقطه ذوب بالا ابتدا در مناطق دندريتي منجمد شده و عناصر با نقطه ذوب پايين‌تر به مناطق بین‌دندريتي پس زده شده‌اند. مانزانوبي و همكاران (2019) در تحقيق خود بيان کرده‌اند دندريت‌ها متشكل از زمينه γ و رسوبات γ' و رسوبات γ و فاز NiAl و فاز γ است که به‌دليل کوچک‌بودن اندازه رسوبات γ' با ميكروسكوب الکتروني روبيسي قابل مشاهده نیستند (Manzoni & Glatzel., 2019).

جدول 3 نشان‌دهنده مقدار عناصر موجود در نواحي دندريتي و بین‌دندريتي برحسب درصد وزني در آلياز ريختگي Al₁₀Co₂₅Cr₈Fe₁₅Ni₃₆Ti₆ است. با مقایسه ميزان عناصر با تركيب شيميائي آلياز می‌توان جدایش عناصر را تشخيص داد.

رفع يا کاهش جدایش عناصر و همچنین رفع ساختار دندريتي مستلزم نفوذ عناصر است. برای فراهم‌کردن شرایط نفوذ، در اين مرحله، شمش تحت عملیات حرارتی همگنسازی قرار گرفت.

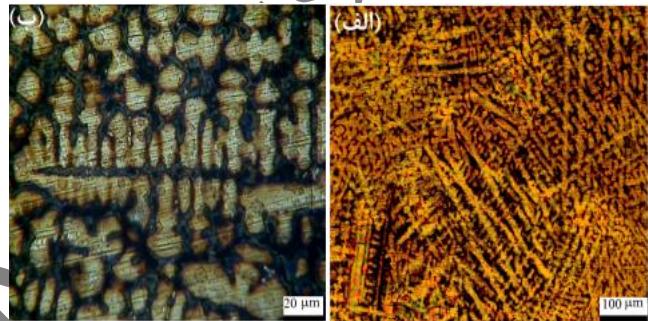


شکل 2. تصاویر ميكروسكوب الکتروني روبيسي به‌همراه آلياز عنصری خطی از سطح آلياز ريختگي Al₁₀Co₂₅Cr₈Fe₁₅Ni₃₆Ti₆

تشکيل فاز‌های بین‌فلزی مانند NiAl در اين آلياز وجود دارد. همچنین، به‌دليل داشتن VEC = 7/97، پيش‌بياني می‌شود که ساختار اين آلياز شامل فاز‌های محلول جامد BCC و FCC باشد.

3-2. بررسی ساختار ریختگی

تصویر ميكروسكوبی نوری از ریزساختار آلياز آنتروپی بالا Al₁₀Co₂₅Cr₈Fe₁₅Ni₃₆Ti₆ در حالت ریختگی (VAR) در شکل 1 نشان داده شده است. ریزساختار شامل دو ناحيه دندريتي و بین‌دندريتي است. مناطق با رنگ روشن ناحيه دندريتي و مناطق با رنگ تيره ناحيه بین‌دندريتي را تشکيل می‌دهند. اين كنتراست رنگ به‌دليل غني‌بودن مناطق بین‌دندريتي از عناصر سبک‌تر است (Huo et al., 2015). در ساختار VIM، دندريت‌ها بهصورت پيوسته، خشن‌تر و، در ساختار VAR، دندريت‌ها ظريف بوده و در كل ساختار پخش شده‌اند.



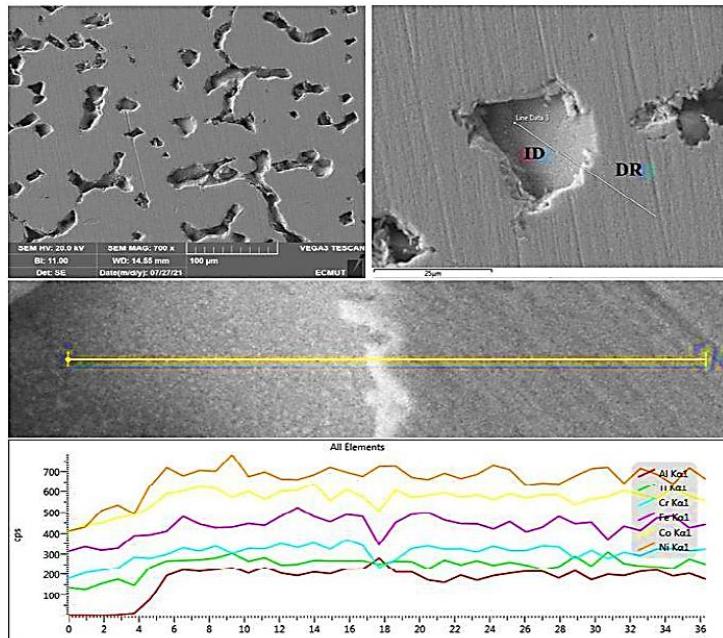
شکل 1. تصاویر ميكروسكوب نوری از ریزساختار آلياز آنتروپی بالا ریختگي Al₁₀Co₂₅Cr₈Fe₁₅Ni₃₆Ti₆ (الف) پس از ذوب مجدد و (ب) پس از ذوب اولية VIM

از ويژگی‌های آلياز‌های ریختگي ساختار دندريتي و جدایش موضعی است. اين پدیده ناشی از غيرتعادلى سردشدن در حين انجماد و عدم‌نفوذ کامل عناصر آليازی است. در تحقيق جيانگ و همكاران (2014)، در حوزه آلياز‌های آنتروپی بالا، ریزساختار دندريتي، بین‌دندريتي و يوتکيتيك گزارش شده است (Jiang et al., 2014). همچنین، بيان شده است که مناطق دندريتي بزرگ‌تر از مناطق بین‌دندريتي هستند که اين موضوع ناپيوستگي ساختار آلياز‌های آنتروپی بالا را نشان می‌دهد. ساختار دندريتي ناشی از دامنه انجماد آلياز است که به جدایش ترکيبي بین هسته دندريت و نواحي بین‌دندريتي منجر شده است. بهطورکلي، عناصر با نقطه ذوب بالا در مناطق دندريتي و عناصر با نقطه ذوب پايين‌تر در مناطق بین‌دندريتي توزيع می‌شوند.

شکل 2 تصاویر ميكروسكوب الکتروني روبيسي از ساختار ریختگي آلياز آنتروپی بالا Al₁₀Co₂₅Cr₈Fe₁₅Ni₃₆Ti₆ را به‌همراه آناليز عنصری خطی نشان می‌دهد. در اين تصویر نيز، نواحي دندريتي

نشان می‌دهد که با انجام عملیات حرارتی همگن‌سازی عناصر Fe، Co و Cr با نفوذ و حل شدن در ساختار زمینه باعث یکنواخت شدن توزیع این عناصر می‌شوند. با مقایسه اشکال ۲ و ۴ مشاهده می‌شود که پس از همگن‌سازی توزیع عناصر همگن‌تر شده است. در حین عملیات حرارتی همگن‌سازی در دمای بالا (1220 درجه سلسیوس) پدیده نفوذ فعال می‌شود و عناصر Fe، Co و Cr که در ساختار ریختگی به صورت دندربیتی منجمد شده بودند، در ساختار زمینه نفوذ می‌کنند.

مقادیر عناصر بر حسب درصد وزنی در مناطق دندربیتی و بین‌دندربیتی آلیاز آنتروپی بالای 1220 درجه سلسیوس بهمدت 17 ساعت در جدول ۴ نشان داده شده است. در مقایسه با جدول ۳ به صورت کمی کاملاً مشهود است که توزیع عناصر به صورت چشمگیری همگن شده است.



شکل ۴. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی به همراه آنالیز عنصری خطی از سطح آلیاز 1220 درجه سلسیوس بهمدت 17 ساعت

جدول ۴. مقادیر درصد وزنی عناصر موجود در مناطق دندربیتی و بین‌دندربیتی آلیاز 1220 درجه سلسیوس بهمدت 17 ساعت

	Ti	Ni	Fe	Cr	Co	Al	عنصر
منطقه دندربیتی	3/9	۳۶/۶	18/2	9/3	29	3/1	ریختگی
همسن	۵/۴	38/2	۱۶/۳	8/1	۲۶/۷	۴/۶	
منطقه بین‌دندربیتی	9/۵	۴۱/۱	۱۱/۴	۵	23/۶	9/۳	ریختگی
ترکیب آلیاز (برای مقایسه)	۵/۳	37/7	۱۶/۵	8/3	27/۵	۵/۲	همگن
	۵/۳	39/1	۱۵/۵	7/7	27/۲	۵	

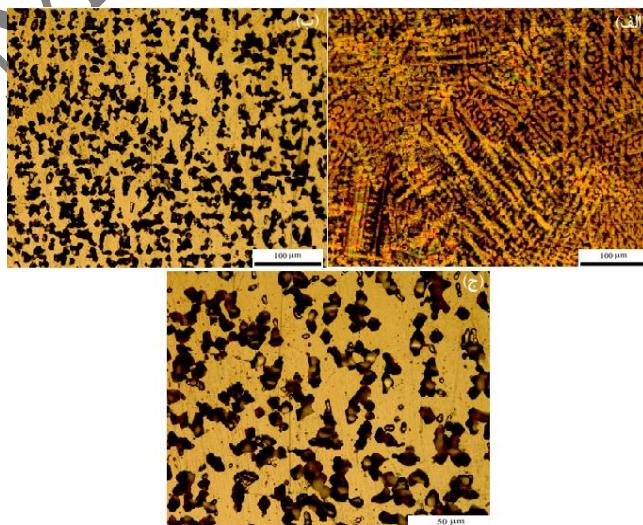
با انجام دادن بررسی‌های ریزساختاری در بزرگنمایی‌های بالاتر که در شکل ۵ نشان داده شده

جدول ۳. مقادیر درصد وزنی عناصر موجود در مناطق دندربیتی و بین‌دندربیتی در آلیاز ریختگی براساس آنالیز EDS

عنصر	Al	Co	Cr	Fe	Ni	Ti
منطقه دندربیتی	3/1	29	9/3	18/2	۳۶/۶	3/9
منطقه بین‌دندربیتی	9/۳	23/۶	۵	11/۴	41/۱	9/۵
ترکیب آلیاز (برای مقایسه)	۵	۲۷/۲	۷/۷	۱۵/۵	39/۱	۵/۳

۳-۳. بررسی ریزساختار همگن شده

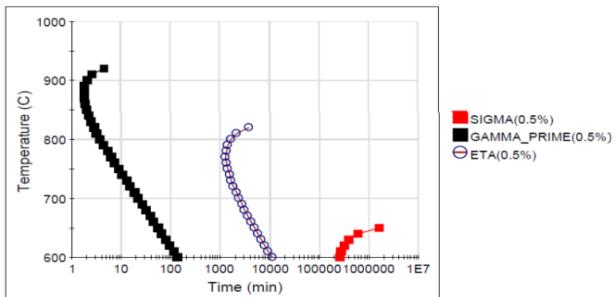
شکل ۳ تصویر نوری از ریزساختار آلیاز را پس از همگن‌سازی نشان می‌دهد. با انجام عملیات حرارتی همگن‌سازی، شکل ظاهری فازها به صورت قابل توجهی تغییر کرده است، کسر حجمی فاز تیرمنگ (بین‌دندربیتی) کاهش یافته و کسر فاز زمینه افزایش یافته است. در واقع، شرایط نفوذ برای عناصر فراهم شده، برخی عناصر مانند Al از نواحی تیره به نواحی روشن و بر عکس برخی عناصر مانند Fe از نواحی روشن به نواحی تیره نفوذ کرده‌اند. اگرچه پس از انجام عملیات حرارتی همگن‌سازی دندربیت‌ها به طور کامل حذف نشده‌اند، از پیوستگی آن‌ها کاسته شده است که این مسئله به معنای یکنواخت‌تر شدن توزیع عناصر است.



شکل ۳. تصاویر نوری از ریزساختار (الف) ریختگی، (ب) و (ج) همگن شده آلیاز آنتروپی بالای 1220 درجه Al10Co25Cr8Fe15Ni36Ti6 سلسیوس بهمدت 17 ساعت

شکل ۴ تصویر ریزساختار میکروسکوپی الکترونی روبشی به همراه آنالیز عنصری خطی از نمونه آلیاز Al10Co25Cr8Fe15Ni36Ti6 در دمای 1220 درجه سلسیوس بهمدت 17 ساعت را نشان می‌دهد. آنالیز عنصری خطی از ناحیه بین‌دندربیتی شروع شده و با گذر از مرز به زمینه رسیده است. نتایج

TTT Al₁₀Co₂₅Cr₈Fe₁₅Ni₃₆Ti₆ High-Entropy Alloy



شکل ۶. نمودار TTT مربوط به آلیاز آنتروپی بالای Al₁₀Co₂₅Cr₈Fe₁₅Ni₃₆Ti₆ رسم شده توسط نرم افزار JMatPro

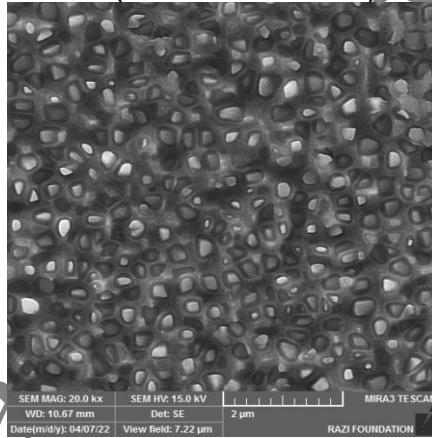
فاز γ' ترکیب بین فلزی با شبکه بلوری منظم L₁₂ و پارامتر شبکه 3/56 آنگستروم است که در آن اتم های Al در گوشش مکعب و اتم های Ni در مرکز وجوه قرار دارند و به صورت Ni₃Al نشان داده می شوند. اما، از آنجاکه مقدار زیادی از عنصر Ti می تواند به جای Al قرار گیرد، آن را به صورت Ni₃(Al,Ti) نیز نمایش می دهدن ([Brooks, 1984](#)). از آنجایی که هر دو فاز γ و γ' دارای شبکه یکسان با ثابت شبکه تقریباً مشابه هستند، می توان استنباط کرد که رسوبات γ' دارای فصل مشترک هم سیما با زمینه γ هستند و شبکه مکعبی، در هر دو فاز، موازی یکدیگر است. بنابراین، انرژی لازم برای جوانهزنی بسیار کم است، رسوبات γ' به آسانی تشکیل می شوند و نیازی به فوق تبرید بالای ندارند رسوبات γ' با استحالت منظم شدن رخ می دهد و در ادامه تحت کنترل نفوذ خواهد بود ([Mitchell et al., 2008](#)).

همان طور که در بسیاری از سوپرآلیاز های پایه نیکل نیز مشخص شده است، تشکیل فاز γ' در طول سر دکردن اجتناب ناپذیر است. بنابراین، نمی توان یک محلول جامد همگن به دست آورد. از آنجایی که هدف اصلی در این عملیات حرارتی حذف و کاهش ساختار دندانی و حذف فاز های غنی از Ti، Ni و NiAl بوده، این عملیات حرارتی مبنایی برای عملیات حرارتی پیر سازی بعدی به شمار می رود.

شکل 7 الگوی پراش پرتو ایکس مربوط به آلیاز آنتروپی بالای Al₁₀Co₂₅Cr₈Fe₁₅Ni₃₆Ti₆ را در شرایط ریختگی و همگن شده نشان می دهد. پیک های مشاهده شده در آنالیز پرتو ایکس در حالت ریختگی با فاز بین فلزی NiAl و فاز γ' مطابقت دارند. با انجام عملیات حرارتی همگن سازی در دمای 1220 درجه سلسیوس، پیک های مطابق با فاز γ' حذف شده اند.

است، مشاهده می شود که، در شمش آنیل شده در 1220 درجه سلسیوس، رسوبات γ' حین سرمایش پس از همگن سازی تشکیل شده اند.

در این پژوهش از رسوبات γ' موجود در آلیاز همگن شده به عنوان رسوبات γ اولیه نام برده می شود. اندازه و کسر حجمی رسوبات توسط نرم افزار J Image اندازه گیری شد که به ترتیب دارای اندازه و کسر حجمی 273 نانومتر و 39 درصد کسر حجمی هستند. همچنین، در پژوهش مانزو نی و همکاران (2019) بیان شده است که اندازه رسوبات γ اولیه در حدود 200 تا 300 نانومتر است ([Manzoni et al., 2019](#)).



شکل ۵. تصویر FE-SEM از آلیاز آنتروپی بالای Al₁₀Co₂₅Cr₈Fe₁₅Ni₃₆Ti₆ همگن شده در دمای 1220 درجه سلسیوس به مدت 17 ساعت که نشان دهنده رسوبات γ' است

به دلیل پایداری فاز γ' در زیر محدوده دمایی 1000 درجه سلسیوس بر اساس نمودار فازی ([Daoud et al., 2015](#)), سر دکردن در کوره این امکان را به وجود آورده است که رسوبات γ' در هنگام خنک سازی در زیر 1000 درجه سلسیوس تشکیل شوند. شکل ۶ نمودار T-T-Al₁₀Co₂₅Cr₈Fe₁₅Ni₃₆Ti₆ را که توسط نرم افزار JMatPro رسم شده است نشان می دهد. با توجه به نمودار T-T-T، حداقل زمان لازم برای ایجاد رسوبات γ' در محدوده دمایی ۹۰۰ تا ۹۵۰ درجه سلسیوس زیر 10 دقیقه (در حدود ۵ دقیقه) است و، از آنجاکه شمش به هنگام خنک سازی به مدت 9/25 دقیقه در محدوده دمایی ۹۰۰ تا ۹۵۰ درجه سلسیوس قرار داشته است، احتمال تشکیل رسوبات γ' در شمش 1220 درجه سلسیوس وجود دارد.

Park: American Society Metals, ISBN: 978-0871701381

Daoud, H., Manzoni, A. M., Wanderka, N., & Glatzel, U. (2015). High-temperature tensile strength of Al₁₀Co₂₅Cr₈Fe₁₅Ni₃₆Ti₆ compositionally complex alloy (high-entropy alloy). *Journal of Materials*, 67(10), 2271-2277. doi: 10.1007/s11837-015-1484-7

Durand-Charre, M. (2017). *The microstructure of superalloys*. Routledge. doi:10.1201/9780203736388

Ghaderi, A., Moghani Algholandis, H., & Soltanalinezhad, M. (2019). Effect of annealing on microstructure and hardness of 10.5CoCrFeNi high entropy alloy. *8th imat*. Tehran: civilika. IMES13_387

Guo, S., Ng, C., Lu, J., & Liu, C. T. (2011). Effect of valence electron concentration on stability of FCC or bcc phase in high entropy alloys. *Journal of Applied Physics*, 109(10), 221-230.doi: 10.1063/1.3587228

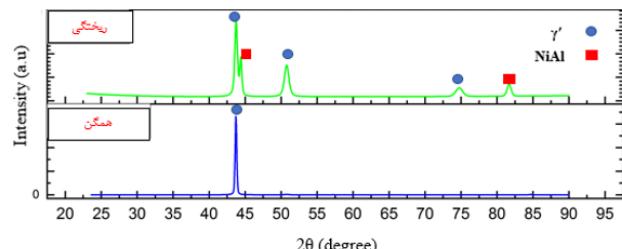
Guo, Q., Xu, X., Pei, X., Duan, Z., Liaw, P. K., Hou, H., & Zhao, Y. (2023). Predict the phase formation of high-entropy alloys by compositions. *Journal of Materials Research and Technology*, 22, 3331-3339. doi:10.1016/j.jmrt.2022.12.143

Huo, W. Y., Shi, H. F., Ren, X., & Zhang, J. Y. (2015). Microstructure and wear behavior of CoCrFeMnNbNi high-entropy alloy coating by TIG cladding. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015, 178-186. doi:10.1155/2015/647351

Jiang, L., Lu, Y., Dong, Y., Wang, T., Cao, Z., & Li, T. (2014). Annealing effects on the microstructure and properties of bulk high-entropy CoCrFeNiTi0. 5 alloy casting ingot. *Intermetallics*, 44, 37-43. doi:10.1016/j.intermet.2013.08.016

Ma, L., Wan, J., Lai, Z., Wu, Z., Yang, B., & Zhao, P. (2023). Microstructure and mechanical property of Al_{56-x}Co₂₄Cr₂₀Ni_x eutectic high-entropy alloys with an ordered FCC/BCT phase structure. *Journal of Alloys and Compounds*, 936, 168-194. doi:10.1016/j.jallcom.2022.168194

Manzoni, A. M., Haas, S., Yu, J. M., Daoud, H. M., Glatzel, U., Aboulfadl, H., ... & Wanderka, N. (2019). Evolution of γ/γ' phases, their misfit and volume fractions in Al₁₀Co₂₅Cr₈Fe₁₅Ni₃₆Ti₆ compositionally complex alloy. *Materials*



شکل 7. الگوی پراش پرتو ایکس مربوط به آلیاز آنتروپی بالای Al₁₀Co₂₅Cr₈Fe₁₅Ni₃₆Ti₆ در شرایط ریختگی و همگن شده

۴- نتیجه‌گیری

آلیاز Al₁₀Co₂₅Cr₈Fe₁₅Ni₃₆Ti₆ با داشتن مقدار آنتروپی اختلاط ۱۳/۰ کیلوژول بر مول در دسته آلیاز های آنتروپی بالا قرار دارد و، بهدلیل داشتن ۸/۸، احتمال تشکیل فاز های بین فلزی مانند NiAl در این آلیاز وجود دارد. همچنین، بهدلیل داشتن VEC = ۷/۹۷ پیش‌بینی می‌شود که ساختار این آلیاز شامل فاز های محلول جامد FCC و BCC باشد.

آلیاز آنتروپی بالای Al₁₀Co₂₅Cr₈Fe₁₅Ni₃₆Ti₆ در حالت ریختگی شامل دو بخش دندربیتی و بین دندربیتی است. ناحیه دندربیتی غنی از عنصر Fe، Cr و Co و ناحیه بین دندربیتی غنی از عنصر Al، Ni و Ti و شامل فاز های NiAl و γ' در زمینه γ است.

عملیات حرارتی همگن سازی، در دمای ۱۲۲۰ درجه سلسیوس، فاز بین فلزی Al NiAl را حل کرده و ساختار دندربیتی کاهش چشمگیری پیدا کرده و از پیوستگی ساختار دندربیتی کاسته شده است. با انجام عملیات همگن سازی، عنصر Al، Ni و Ti از مناطق بین دندربیتی به مناطق دندربیتی و عنصر Co و Fe و Cr و شکل را دارند. از مناطق دندربیتی به مناطق بین دندربیتی نفوذ کرده اند.

۵- سپاسگزاری

نویسنده‌گان از محققان پژوهشکده مهندسی مواد دانشگاه صنعتی مالک اشتر، که در انجامدادن این پژوهش ما را یاری کرده اند، کمال قدردانی و تشکر را دارند.

منابع

Asgarkhani, N., Seifollahi, M., & Abbasi, S. M. (2023). Effect of aging treatment on the microstructure and mechanical properties of Al_{0.7}CoCrFeNi high entropy alloy. *International Journal of Engineering*, 36(6), 1060-1065. doi:10.5829/IJE.2023.36.06C.04

Brooks, C. R. (1984). *Heat treatment, structure, and properties of nonferrous alloys*. Metals

[doi:10.1016/j.matchemphys.2023.127314](https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.127314)

Zhang, K., & Fu, Z. (2012). Effects of annealing treatment on phase composition and microstructure of CoCrFeNiTiAl_x high-entropy alloys. *Intermetallics*, 36(6), 24-32. [doi: 10.1016/j.intermet.2011.10.010](https://doi.org/10.1016/j.intermet.2011.10.010)

Zhang, Y., Zuo, T. T., Tang, Z., Gao, M. C., Dahmen, K. A., Liaw, P. K., & Lu, Z. P. (2014). Microstructures and properties of high-entropy alloys. *Progress in Materials Science*, 61, 1-93. [doi:10.1016/j.pmatsci.2013.10.001](https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2013.10.001)

Characterization, 154, 363-376.

[doi:10.1016/j.matchar.2019.06.009](https://doi.org/10.1016/j.matchar.2019.06.009)

Manzoni, A. M., & Glatzel, U. (2019). New multiphase compositionally complex alloys driven by the high entropy alloy approach. *Materials Characterization*, 147, 512-532. [doi:10.1016/j.matchar.2018.06.036](https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.06.036)

Mitchell, R. J., Preuss, M., Tin, S., & Hardy, M. C. (2008). The influence of cooling rate from temperatures above the γ' solvus on morphology, mismatch and hardness in advanced polycrystalline nickel-base superalloys. *Materials Science and Engineering A*, 473(1-2), 158-165. [doi:10.1016/j.msea.2007.04.098](https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.04.098)

Munitz, A., Salhov, S., Hayun, S., & Brage, N. (2016). Heat treatment impacts the microstructure and mechanical properties of AlCoCrFeNi high entropy alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 683, 221-230. [doi:10.1016/j.jallcom.2016.05.034](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.05.034)

Shen, Q., Huang, D., Li, F., Liu, M., & Wang, X. (2023). Microstructures and mechanical properties of the precipitation strengthened Al0.4Cr0.7FexNi2V0.2 high entropy alloys. *Materials Science and Engineering A*, 864, 144606. [doi:10.1016/j.msea.2023.144606](https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.144606)

Shi, Y., Collins, L., Feng, R., Zhang, C., Balke, N., Liaw, P. K., & Yang, B. (2018). Homogenization of Al_xCoCrFeNi high-entropy alloys with improved corrosion resistance. *Corrosion Science*, 133, 120-131. [doi:10.1016/j.corsci.2018.01.030](https://doi.org/10.1016/j.corsci.2018.01.030)

Takeuchi, A., Amiya, K., Wada, T., Yubuta, K., & Zhang, W. (2014). High-entropy alloys with a hexagonal close-packed structure designed by equi-atomic alloy strategy and binary phase diagrams. *Journal of Materials*, 66(10), 1984-1992. [doi:10.1007/s11837-014-1085-x](https://doi.org/10.1007/s11837-014-1085-x)

Yuan, J., Zhang, H., Wang, Z., Han, P., & Qiao, J. (2023). Contribution of coherent precipitates on mechanical properties of CoCrFeNiTi0.2 high-entropy alloy at room and cryogenic temperatures. *Intermetallics*, 154, 107-820. [doi:10.1016/j.intermet.2022.107820](https://doi.org/10.1016/j.intermet.2022.107820)

Zeng, X., Li, F., Zhou, X., Yan, W., Li, J., Yang, D., ... & Liu, M. (2023). The phase stability at intermediate-temperature and mechanical behavior of the dual-phase AlCoCr0.5FexNi2.5 high entropy alloys. *Materials Chemistry and Physics*, 297, 127314.