

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

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

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

³ Researcher, 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: 2023-10-29

Revised: 2024-01-17

Accepted: 2024-03-10

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 γ^+ γ' in the dendritic zones and γ^+ 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.2024.419852.1290>

URL: https://www.jamt.ir/article_193276.html

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. Muntiz 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 in turn increased the elongation of the alloy. Ghaderi et al. (Ghaderi et al., 2019) revealed that $\text{Al}_{0.5}\text{CoCrFeNi}$ 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 $\text{Al}_{10}\text{Co}_{25}\text{Cr}_8\text{Fe}_{15}\text{Ni}_{36}\text{Ti}_6$ alloy.

2. METHOD

$\text{Al}_{0.7}\text{CoCrFeNi}$ 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 HNO_3 + 10ml H_2O 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 (δr) and electronegativity (δc) 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:

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

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

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

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

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

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

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

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 $Al_{10}Co_{25}Cr_8Fe_{15}Ni_{36}Ti_6$ cast alloy. The alloy has rough continuous dendrite after VIM and fine one after VAR process.

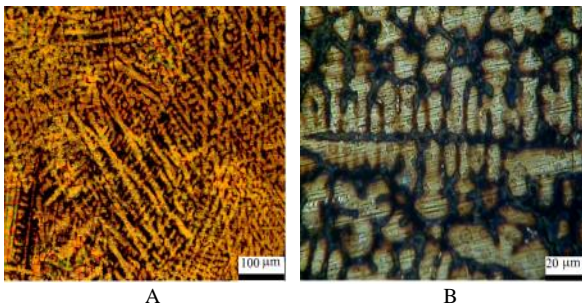


Figure 1. OM microstructure of $Al_{10}Co_{25}Cr_8Fe_{15}Ni_{36}Ti_6$ cast alloy after a) VIM and b) VAR

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.

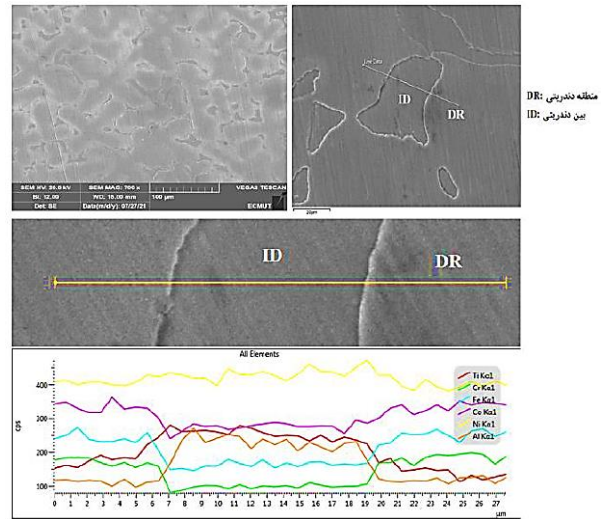


Figure 2. SEM micrograph and line scan elemental analysis of $Al_{10}Co_{25}Cr_8Fe_{15}Ni_{36}Ti_6$ cast alloy

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).

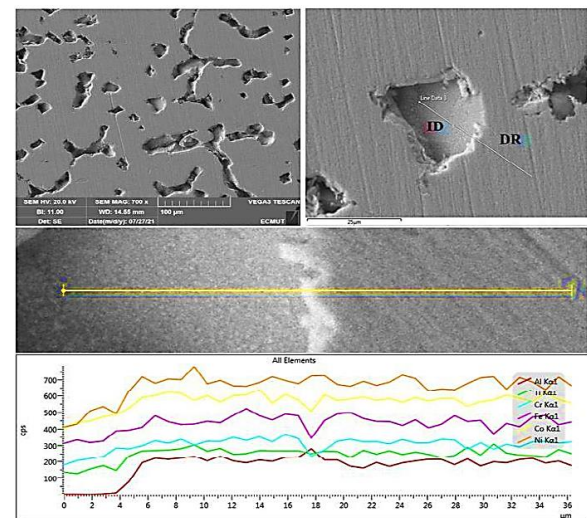


Figure 3. SEM micrograph and line scan elemental analysis of $Al_{10}Co_{25}Cr_8Fe_{15}Ni_{36}Ti_6$ homogenized alloy at 1220 °C for 17 hr

4. CONCLUSION AND SUGGESTIONS

Al₁₀Co₂₅Cr₈Fe₁₅Ni₃₆Ti₆ 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 probable.

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.

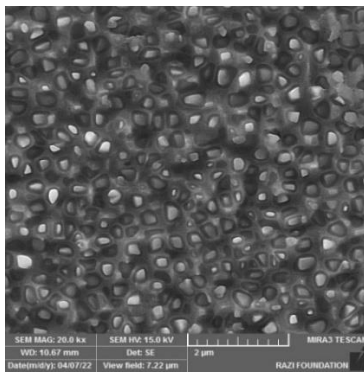


Figure 4. FE-SEM micrograph of γ' phases after homogenizing at 1220 °C for 17 hr

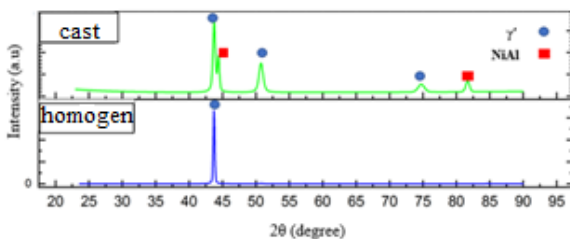


Figure 5. XRD pattern of Al₁₀Co₂₅Cr₈Fe₁₅Ni₃₆Ti₆.

REFERENCES

1. A.Ghaderi, H. moghni alghlandis, M. Soltani nejad, A. Abbasi, K. Dehghani (2019). Effect of annealing on microstructure and hardness of 10.5CoCrFeNi high entropy alloy. *8th imat*. Tehran: civilika. in persian. [IMES13_387](https://doi.org/10.1016/j.imat.2019.05.001)
2. Ma, L., Wan, J., Lai, Z., Wu, Z., Yang, B., & Zhao, P. (2023). Microstructure and mechanical property of Al56-xCo24Cr20Ni_x eutectic high-entropy alloys with an ordered FCC/BCT phase structure. *Journal of Alloys and Compounds*, 936, 168-194. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.168194>
3. Munitz A, Salhov S, Hayun S, Frage N. (2016). Heat treatment impacts the micro-structure and mechanical properties of AlCoCrFeNi high entropy alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 683, 221-230. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.05.034>
4. Shen Q, Huang D, Li F, Liu M, Wang X. (2023). Microstructures and mechanical properties of the precipitation strengthened Al0.4Cr0.7FeNi2V0.2 high entropy alloys. *Materials Science and Engineering A*, 864, 144606. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.144606>

5. 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. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2018.01.030>
6. 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. <https://doi.org/10.1007/s11837-014-1085-x>
7. 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. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2022.107820>
8. 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 AlCoCr0.5FeNi2.5 high entropy alloys. *Materials Chemistry and Physics*, 297, 127314. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.127314>



مقاله کامل پژوهشی

ارزیابی ریزساختار آلیاژ آنتروپی بالای $Al_{10}Co_{25}Cr_8Fe_{15}Ni_{36}Ti_6$ در حالت ریختگی و همگن شده

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

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

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

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

تاریخچه مقاله:

ثبت اولیه: ۱۴۰۲/۰۸/۰۷

بازنگری: ۱۴۰۲/۱۰/۲۷

پذیرش قطعی: ۱۴۰۲/۱۲/۲۰

کلیدواژه‌ها:

آلیاژ آنتروپی بالا،

$Al_{10}Co_{25}Cr_8Fe_{15}Ni_{36}Ti_6$

ریزساختار،

همگن سازی

چکیده هدف از این پژوهش ارزیابی ساختار ریختگی و همگن شده آلیاژ آنتروپی بالای $Al_{10}Co_{25}Cr_8Fe_{15}Ni_{36}Ti_6$ است. در این پژوهش، ریزساختار آلیاژ پس از ریخته‌گری در کوره ذوب القایی تحت خلأ 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 $\delta = 13/0 \text{ eKJ/mol}$ و $VEC = 7/97$ است که پیش‌بینی می‌شود ساختار این آلیاژ شامل فازهای محلول جامد FCC و BCC و فازهای میانی باشد. در حالت ریختگی، ساختار در نواحی دندریتی متشکل از زمینه γ و رسوبات γ' و نواحی بین‌دندریتی شامل رسوبات γ' و فاز NiAl است. پس از انجام عملیات حرارتی همگن‌سازی، دندریت‌ها 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.



<https://doi.org/10.30501/jamt.2024.419852.1290>

URL: https://www.jamt.ir/article_193276.html

۱- مقدمه

خواهد داشت و در مجموع تمایل به حالیت و تشکیل فازهای محلول جامد را افزایش می‌دهد و از تشکیل تعداد زیاد فازها جلوگیری می‌کند (Zhang et al., 2014)

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 $10 - \frac{6}{\sqrt{e}} \leq \Delta H_{mix} \leq -5 \frac{KJ}{mol}$ و $\delta \leq \Delta S_{mix} \leq \frac{19}{5} \frac{J}{K.mol}$ و ۱۱ باشد. علاوه بر این، پارامتر دیگری که به پیش‌بینی ساختار بلورنگاری (کریستالوگرافی)

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 (Takeuchi et al., 2023; Ma et al., 2014).

بسیاری از آلیاژهای آنتروپی بالا محلولی جامد را تشکیل می‌دهند و تعداد فازهای مشاهده شده در این آلیاژها بسیار کمتر از تعداد پیش‌بینی شده از قانون فازی گیبس است. مخلوط شدن چند عنصر اصلی در آلیاژهای آنتروپی بالا آثاری از جمله اثر کوکتیل، اثر آنتروپی بالا، اعوجاج شدید در شبکه و نفوذ کند را

*عهده‌دار مکاتبات: معصومه سیف‌اللهی

نشانی: تهران، ایران، تهران، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، تلفن: ۰۲۱-۲۲۹۳۵۱۴۱، دورنگار: ۰۲۱-۲۲۹۳۵۳۴۱

پیام‌نگار: m_seifollahi@mut.ac.ir

کمک می‌کند غلظت الکترون ظرفیت^۱ یا VEC است. VEC الکترونی است که در تشکیل پیوند شیمیایی شرکت می‌کند و در ساختار و خصوصیات آلیاژهای آنتروپی بالا تأثیرگذار است. با VEC معادل، پایداری فاز FCC و BCC در آلیاژهای آنتروپی بالا را می‌توان پیش‌بینی کرد (Zhang & Fu, ;Guo et al., 2023). (2012).

عموماً ریزساختار آلیاژهای آنتروپی بالا شامل نواحی دندریتی و بین‌دندریتی است. رسوبات صفحه‌ای یا کروی شکل و فازهای نانو ساختار اغلب در نواحی دندریتی یافت می‌شوند. از جمله 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 عدم نفوذ کامل عناصر آلیاژی هستند باعث افت خواص مکانیکی آلیاژ از جمله قابلیت کار گرم یا سرد و همچنین کاهش کیفیت و کارایی عملیات حرارتی گوناگون می‌شوند. از این رو، ساختار و ترکیب شیمیایی آلیاژهای ریختگی باید، به کمک عملیات حرارتی مناسب، همگن یا یکنواخت شوند (Munitz et al., ;Zeng et al., 2023; 2016).

سیستم آلیاژی $Al_{10}Co_{25}Cr_8Fe_{15}Ni_{36}Ti_6$ ، به دلیل 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 انجام 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.

۲- روش تحقیق

آلیاژ آنتروپی بالای $Al_{10}Co_{25}Cr_8Fe_{15}Ni_{36}Ti_6$ از عناصر تشکیل‌دهنده با خلوص بالای ۹۹/۵ درصد در کوره ذوب القایی تحت خلأ ذوب و ریخته‌گری شد. برای رفع عیوب ریختگی و بهبود همگنی ساختار و کاهش ساختار دندریتی، آلیاژ تحت عملیات ذوب مجدد قرار گرفت. ظرفیت کوره VIM ۱۶ کیلوگرم و توان آن ۳۰ کیلو وات و دارای بوتته آلومینایی و قالب گرافیتی با خلأ اولیه کوره 5×10^{-4} میلی بار بود. عملیات ذوب مجدد در کوره ذوب مجدد قوسی تحت خلأ با شدت جریان ۳۵۰۰ آمپر و ولتاژ ۳۰-۳۱ 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 $Al_{10}Co_{25}Cr_8Fe_{15}Ni_{36}Ti_6$ با استفاده از میکروسکوپ الکترونی

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

شی و همکاران (۲۰۱۸) دریافتند که همگن‌سازی در دمای ۱۲۵۰ درجه سلسیوس به مدت ۱۰۰۰ ساعت موجب تغییرات چشمگیر در ریزساختار، افزایش اندازه دانه و بهبود مقاومت به خوردگی آلیاژ $Al_{0.7}CoCrFeNi$ می‌شود (Shi et al., 2018). همچنین، در تحقیقی دیگر مونتیز و همکاران (۲۰۱۶) اثر همگن‌سازی را در آلیاژ آنتروپی بالای $AlCoCrFeNi$ در دمای ۱۲۰۰ درجه سلسیوس به مدت ۳ 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; al., 2016). در تحقیقی دیگر، قادری و همکاران (۲۰۱۹) تأثیر همگن‌سازی را در ریزساختار و سختی آلیاژ آنتروپی بالای

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

محدوده آنتروپی اختلاط برای آلیاژهای آنتروپی بالا ۱۱

تا $19/5 \frac{J}{K.mol}$ است. مقدار آنتروپی اختلاط محاسبه شده برای آلیاژ حاضر در محدوده مقدار بیان شده برای تشکیل آلیاژ آنتروپی بالا قرار دارد.

غلظت الکترون‌های لایه ظرفیت (VEC) از رابطه ۲ محاسبه می‌شود:

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

مقادیر VEC عناصر در جدول ۲ ارائه شده و طبق رابطه ۲

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 فازهای FCC و BCC در آلیاژهای آنتروپی بالا را می‌توان پیش‌بینی کرد. برای آلیاژهای آنتروپی بالا با VEC بزرگ‌تر از ۸ فقط فاز FCC وجود دارد. در مقابل، در آلیاژهای آنتروپی بالا با VEC کمتر از ۷/۸۷ فاز غالب، فاز BCC است. اما، زمانی که VEC در فاصله ۶/۸۷ تا ۸ قرار داشته باشد، مخلوطی از فازهای FCC و BCC مشاهده می‌شوند (Guo et al., 2011). با توجه به مقدار محاسبه شده ۷/۹۷ در این آلیاژ، پیش‌بینی می‌شود که ساختار شامل فازهای FCC و BCC باشد.

تفاوت در شعاع اتمی (δ) یکی دیگر از معیارهای ارزیابی آلیاژهای آنتروپی بالا است که به صورت رابطه ۳ محاسبه می‌شود:

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

مقدار r از رابطه ۴ محاسبه می‌شود:

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

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

روشنی مدل MIRA3 و به کمک 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	Al	Co	Cr	Fe	Ni	Ti
ترکیب اسمی (درصد وزنی)	۵	۲/۳	۷/۷	۱/۵	۳/۱	۵/۳
ترکیب اسمی (درصد اتمی)	۱۰	۲۵	۸	۱۵	۳۶	۶
نتایج EDS (درصد وزنی)	۵/۴	۲/۹	۷/۳	۱/۳	۳/۴	۵/۳
نتایج EDS (درصد اتمی)	۰	۲/۵	۷/۶	۱/۷	۳۶	۶

آلیاژ در دمای ۱۲۲۰ درجه سلسیوس به مدت ۱۷ ساعت همگن شد. برای جلوگیری از ایجاد ترک در مرزدانه‌ها، شمش تا دمای ۹۵۰ درجه سلسیوس با نرخ $08/0^\circ C/s$ در کوره و سپس در هوا تا دمای محیط سرد شد.

به منظور بررسی‌های ریزساختاری از میکروسکوپ نوری OLYMPUS و میکروسکوپ الکترونی روبشی MIRA3 مجهز به آنالیز عنصری EDS استفاده شد. نمونه‌ها برای بررسی‌های ریزساختاری، پس از آماده‌سازی سطحی (سنباده‌زنی و پولیش نمونه‌ها)، در محلول $HCl + HNO_3 + H_2O$ به نسبت‌های برابر به مدت زمان ۳ دقیقه اچ شدند. به منظور تعیین قطر و کسر حجمی رسوبات γ از ImageJ و همچنین به منظور فازبندی از دستگاه پراش پرتو ایکس^۱، ASEWARE مدل AW-XDM300 با تابش CuK α و طول موج $1/54 \text{ \AA}$ استفاده شد. همچنین، برای تحلیل داده‌های آنالیز پراش پرتو ایکس از نرم‌افزار HighScore Ver.3 Xpert استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱. بررسی معیارهای تشکیل آلیاژ آنتروپی بالا

در این بخش، معیارهای امکان‌سنجی تشکیل آلیاژ آنتروپی بالا برای آلیاژ تولیدی در این پژوهش با ترکیب جدول ۱ ارزیابی می‌شود. r_i و C_i به ترتیب درصد اتمی و شعاع اتمی عنصر i هستند.

آنتروپی اختلاط (ΔS_{mix}) از رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

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

از ویژگی‌های آلیاژهای ریختگی ساختار دندریتی و جدایش موضعی است. این پدیده ناشی از غیرتعادلی سردشدن در حین انجماد و عدم نفوذ کامل عناصر آلیاژی است. در تحقیق جیانگ و همکاران (۲۰۱۴)، در حوزه آلیاژهای آنتروپی بالا، ریزساختار دندریتی، بین دندریتی و یونکتیک گزارش شده است (Jiang et al., 2014). همچنین، بیان شده است که مناطق دندریتی بزرگ‌تر از مناطق بین دندریتی هستند که این موضوع ناپیوستگی ساختار آلیاژهای آنتروپی بالا را نشان می‌دهد. ساختار دندریتی ناشی از دامنه انجماد آلیاژ است که به جدایش ترکیبی بین هسته دندریت و نواحی بین دندریتی منجر شده است. به‌طور کلی، عناصر با نقطه ذوب بالا در مناطق دندریتی و عناصر با نقطه ذوب پایین‌تر در مناطق بین دندریتی توزیع می‌شوند.

شکل ۲ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ساختار ریختگی آلیاژ آنتروپی بالای $Al_{10}Co_{25}Cr_8Fe_{15}Ni_{36}Ti_6$ را به همراه آنالیز عنصری خطی نشان می‌دهد. در این تصویر نیز، نواحی دندریتی و بین دندریتی به‌وضوح مشخص هستند و نتایج حاصل از تصاویر نوری را تأیید می‌کنند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با شروع آنالیز در ناحیه بین دندریتی، مقدار آهن، کروم و کبالت کاهش پیدا کرده و مقدار آلومینیم و تیتانیم افزایش یافته است.

تحقیق حاضر این پیش‌بینی را که نواحی بین دندریتی باید غنی از عناصر با دمای ذوب کمتر و عناصر سبک‌تر باشند تأیید می‌کند. مناطق بین دندریتی و دندریتی به ترتیب غنی از آلومینیم، نیکل و تیتانیم و غنی از آهن، کروم و کبالت هستند. عناصر با نقطه ذوب بالا ابتدا در مناطق دندریتی منجمد شده و عناصر با نقطه ذوب پایین‌تر به مناطق بین دندریتی پس زده شده‌اند.

مانزونی و همکاران (۲۰۱۹) در تحقیق خود بیان کرده‌اند دندریت‌ها متشکل از زمینه γ و رسوبات γ' و نواحی بین دندریتی شامل رسوبات γ' و فاز NiAl و فاز η است که به دلیل کوچک بودن اندازه رسوبات γ' با میکروسکوپ الکترونی روبشی قابل مشاهده نیستند (Manzoni & Glatzel., 2019).

جدول ۳ نشان‌دهنده مقدار عناصر موجود در نواحی دندریتی و بین دندریتی برحسب درصد وزنی در آلیاژ ریختگی

جدول ۲. شعاع اتمی و غلظت الکترون‌های لایه ظرفیت عناصر تشکیل‌دهنده آلیاژ $Al_{10}Co_{25}Cr_8Fe_{15}Ni_{36}Ti_6$ در پژوهش حاضر

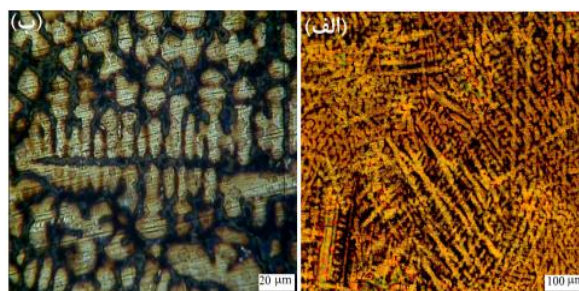
عنصر	Al	Co	Cr	Fe	Ni	Ti
$r (A^\circ)$	۱/۱۸	۱/۵۲	۱/۶۶	۱/۵۶	۱/۴۹	۱/۷۶
VEC	۳	۹	۶	۸	۱۰	۴

در نتیجه، مقدار δ برابر خواهد بود با $8/8$ که در مقادیر کمتر $6/6$ احتمال تشکیل فازهای بین‌فلزی در آلیاژ آنتروپی بالا وجود ندارد و در مقادیر بیش از آن احتمال تشکیل فاز بین‌فلزی وجود دارد (Zhang & Fu, 2012).

با توجه به محاسبات انجام‌شده، آلیاژ $Al_{10}Co_{25}Cr_8Fe_{15}Ni_{36}Ti_6$ با داشتن مقدار آنتروپی اختلاط $13/05$ کیلوژول بر مول در دسته آلیاژهای آنتروپی بالا قرار دارد و به دلیل داشتن $8/8 = \delta$ احتمال تشکیل فازهای بین‌فلزی مانند NiAl در این آلیاژ وجود دارد. همچنین، به دلیل داشتن $VEC = 7/97$ ، پیش‌بینی می‌شود که ساختار این آلیاژ شامل فازهای محلول جامد FCC و BCC باشد.

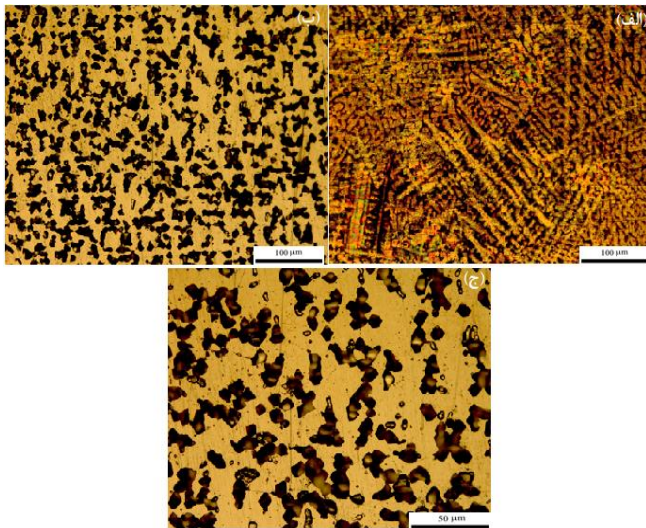
۲-۳. بررسی ساختار ریختگی

تصویر میکروسکوپی نوری از ریزساختار آلیاژ آنتروپی بالای $Al_{10}Co_{25}Cr_8Fe_{15}Ni_{36}Ti_6$ در حالت ریختگی (VIM) و VAR در شکل ۱ نشان داده شده است. ریزساختار شامل دو ناحیه دندریتی و بین دندریتی است. مناطق با رنگ روشن ناحیه دندریتی و مناطق با رنگ تیره ناحیه بین دندریتی را تشکیل می‌دهند. این کنتراست رنگ به دلیل غنی بودن مناطق بین دندریتی از عناصر سبک‌تر است (Huo et al., 2015). در ساختار VIM، دندریت‌ها به صورت پیوسته، خشن‌تر و، در ساختار VAR، دندریت‌ها ظریف بوده و در کل ساختار پخش شده‌اند.



شکل ۱. تصاویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار آلیاژ آنتروپی بالای ریختگی $Al_{10}Co_{25}Cr_8Fe_{15}Ni_{36}Ti_6$ (الف) پس از ذوب مجدد VAR و (ب) پس از ذوب اولیه VIM

همگن‌سازی دندریته‌ها به‌طور کامل حذف نشده‌اند، از پیوستگی آن‌ها کاسته شده است که این مسئله به‌معنای یکنواخت‌تر شدن توزیع عناصر است.

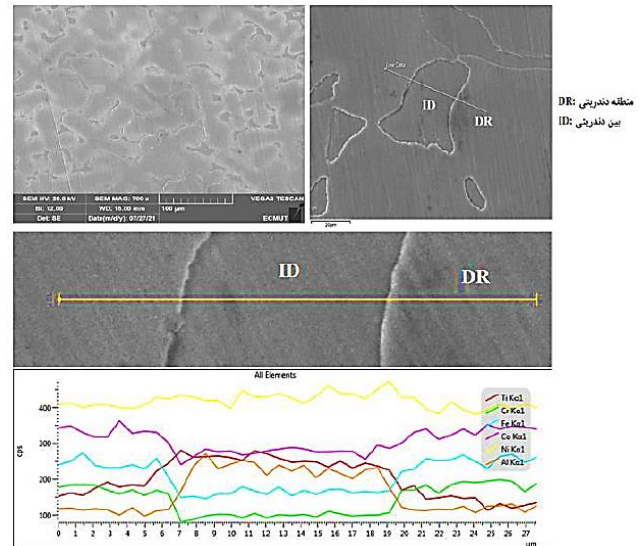


شکل ۳. تصاویر نوری از ریزساختار (الف) ریختگی، (ب و ج) همگن شده آلیاژ آنتروپی بالای $Al_{10}Co_{25}Cr_8Fe_{15}Ni_{36}Ti_6$ در دمای ۱۲۲۰ درجه سلسیوس به مدت ۱۷ ساعت

شکل ۴ تصویر ریزساختار میکروسکوپی الکترونی روبشی به همراه آنالیز عنصری خطی از نمونه آلیاژ $Al_{10}Co_{25}Cr_8Fe_{15}Ni_{36}Ti_6$ همگن شده در دمای ۱۲۲۰ درجه سلسیوس به مدت ۱۷ ساعت را نشان می‌دهد. آنالیز عنصری خطی از ناحیه بین‌دندریته شروع شده و با گذر از مرز به زمینه رسیده است. نتایج 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 (۱۲۲۰ درجه سلسیوس) پدیده نفوذ فعال می‌شود و عناصر Fe، Co و Cr که در ساختار ریختگی به صورت دندریته منجمد شده بودند، در ساختار زمینه نفوذ می‌کنند.

مقادیر عناصر بر حسب درصد وزنی در مناطق دندریته و بین‌دندریته آلیاژ آنتروپی بالای $Al_{10}Co_{25}Cr_8Fe_{15}Ni_{36}Ti_6$ همگن شده در دمای ۱۲۲۰ درجه سلسیوس به مدت ۱۷ 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.

$Al_{10}Co_{25}Cr_8Fe_{15}Ni_{36}Ti_6$ است. با مقایسه میزان عناصر با ترکیب شیمیایی آلیاژ می‌توان جدایش عناصر را تشخیص داد. رفع یا کاهش جدایش عناصر و همچنین رفع ساختار دندریته مستلزم نفوذ عناصر است. برای فراهم کردن شرایط نفوذ، در این مرحله، شمش تحت عملیات حرارتی همگن‌سازی قرار گرفت.

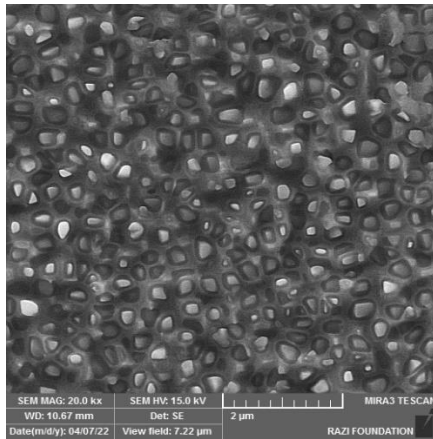


شکل ۲. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی به همراه آنالیز عنصری خطی از سطح آلیاژ ریختگی $Al_{10}Co_{25}Cr_8Fe_{15}Ni_{36}Ti_6$ جدول ۳. مقادیر درصد وزنی عناصر موجود در مناطق دندریته و بین‌دندریته در آلیاژ ریختگی $Al_{10}Co_{25}Cr_8Fe_{15}Ni_{36}Ti_6$ براساس آنالیز EDS

عنصر	Al	Co	Cr	Fe	Ni	Ti
منطقه دندریته	۳/۱	۲۹	۹/۳	۱۸/۲	۳۶/۶	۳/۹
منطقه بین‌دندریته	۹/۳	۲۳/۶	۵	۱۱/۴	۴۱/۱	۹/۵
ترکیب آلیاژ (برای مقایسه)	۵	۲۷/۲	۷/۷	۱۵/۵	۳۹/۱	۵/۳

۳-۳. بررسی ریزساختار همگن شده

شکل ۳ تصویر نوری از ریزساختار آلیاژ را پس از همگن‌سازی نشان می‌دهد. با انجام عملیات حرارتی همگن‌سازی، شکل ظاهری فازها به صورت قابل توجهی تغییر کرده است، کسر حجمی فاز تیره‌رنگ (بین‌دندریته) 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 برعکس برخی عناصر مانند Fe از نواحی روشن به نواحی تیره نفوذ کرده‌اند. اگرچه پس از انجام عملیات حرارتی

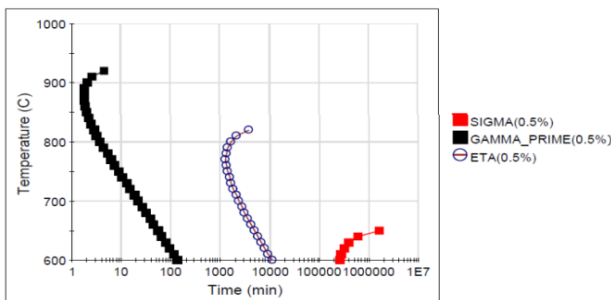


شکل ۵. تصویر FE-SEM از آلیاژ آنتروپی بالای

$Al_{10}Co_{25}Cr_8Fe_{15}Ni_{36}Ti_6$ همگن شده در دمای ۱۲۲۰ درجه سلسیوس به مدت ۱۷ ساعت که نشان دهنده رسوبات γ است

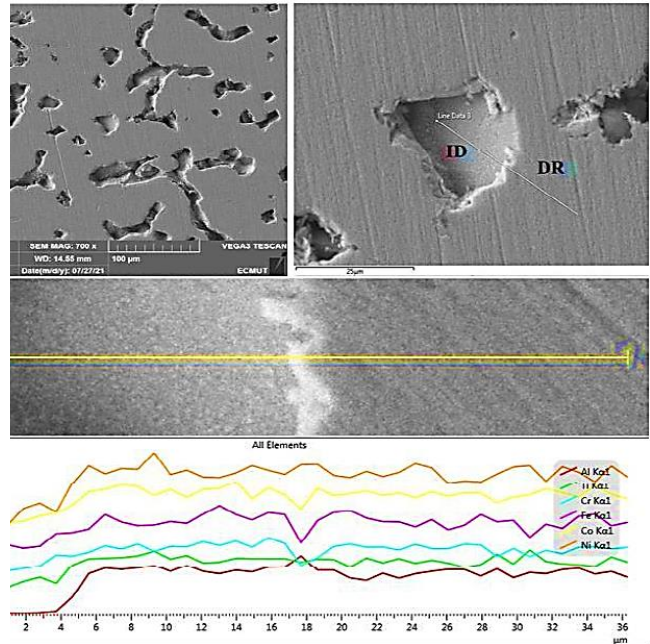
به دلیل پایداری فاز γ در زیر محدوده دمایی ۱۰۰۰ درجه سلسیوس براساس نمودار فازی (Daoud et al., 2015)، سردکردن در کوره این امکان را به وجود آورده است که رسوبات γ در هنگام خنک سازی در زیر ۱۰۰۰ درجه سلسیوس تشکیل شوند. شکل ۶ نمودار T-T-T آلیاژ آنتروپی بالا $Al_{10}Co_{25}Cr_8Fe_{15}Ni_{36}Ti_6$ را که توسط 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 ۱۰ دقیقه (در حدود ۵ دقیقه) است و، از آنجاکه شمش به هنگام خنک سازی به مدت ۹/۲۵ دقیقه در محدوده دمایی ۹۰۰ تا ۹۵۰ درجه سلسیوس قرار داشته است، احتمال تشکیل رسوبات γ در شمش $Al_{10}Co_{25}Cr_8Fe_{15}Ni_{36}Ti_6$ همگن شده در دمای ۱۲۲۰ درجه سلسیوس وجود دارد.

TTT $Al_{10}Co_{25}Cr_8Fe_{15}Ni_{36}Ti_6$ High-Entropy Alloy



شکل ۶. نمودار TTT مربوط به آلیاژ آنتروپی بالای

$Al_{10}Co_{25}Cr_8Fe_{15}Ni_{36}Ti_6$ رسم شده توسط نرم افزار JMatPro



شکل ۴. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی به همراه آنالیز

عنصری خطی از سطح آلیاژ $Al_{10}Co_{25}Cr_8Fe_{15}Ni_{36}Ti_6$ همگن شده در دمای ۱۲۲۰ درجه سلسیوس به مدت ۱۷ ساعت

جدول ۴. مقادیر درصد وزنی عناصر موجود در مناطق دندریتی و بین دندریتی آلیاژ $Al_{10}Co_{25}Cr_8Fe_{15}Ni_{36}Ti_6$ همگن شده در دمای ۱۲۲۰ درجه سلسیوس به مدت ۱۷ ساعت

عنصر		Ti	Ni	Fe	Cr	Co	Al
منطقه دندریتی	ریختگی	۳/۹	۳۶/۶	۱۸/۲	۹/۳	۲۹	۳/۱
	همگن	۵/۴	۳۸/۲	۱۶/۳	۸/۱	۲۶/۷	۴/۶
منطقه بین دندریتی	ریختگی	۹/۵	۴۱/۱	۱۱/۴	۵	۲۳/۶	۹/۳
	همگن	۵/۳	۳۷/۷	۱۶/۵	۸/۳	۲۷/۵	۵/۲
ترکیب آلیاژ (برای مقایسه)		۵/۳	۳۹/۱	۱۵/۵	۷/۷	۲۷/۲	۵

با انجام دادن بررسی های ریزساختاری در بزرگ نمایی های بالاتر که در شکل ۵ نشان داده شده است، مشاهده می شود که، در شمش آنیل شده در ۱۲۲۰ درجه سلسیوس، رسوبات γ حین سرمایش پس از همگن سازی تشکیل شده اند.

در این پژوهش از رسوبات γ موجود در آلیاژ همگن شده به عنوان رسوبات γ اولیه نام برده می شود. اندازه و کسر حجمی رسوبات توسط نرم افزار Image J اندازه گیری شد که به ترتیب دارای اندازه و کسر حجمی ۲۷۳ نانومتر و ۳۹ درصد کسر حجمی هستند. همچنین، در پژوهش مانزونی و همکاران (۲۰۱۹) بیان شده است که اندازه رسوبات γ اولیه در حدود ۲۰۰ تا ۳۰۰ نانومتر است (Manzoni et al., 2019).

۴- نتیجه‌گیری

آلیاژ $\text{Al}_{10}\text{Co}_{25}\text{Cr}_8\text{Fe}_{15}\text{Ni}_{36}\text{Ti}_6$ با داشتن مقدار آنتروپی اختلاط $13/05$ کیلوژول بر مول در دسته آلیاژهای آنتروپی بالا قرار دارد و، به دلیل داشتن $\delta = 1/8$ ، احتمال تشکیل فازهای بین‌فلزی مانند NiAl در این آلیاژ وجود دارد. همچنین، به دلیل داشتن $\text{VEC} = 7/97$ ، پیش‌بینی می‌شود که ساختار این آلیاژ شامل فازهای محلول جامد FCC و BCC باشد.

آلیاژ آنتروپی بالای $\text{Al}_{10}\text{Co}_{25}\text{Cr}_8\text{Fe}_{15}\text{Ni}_{36}\text{Ti}_6$ در حالت ریختگی شامل دو بخش دندریتی و بین‌دندریتی است. ناحیه دندریتی غنی از عناصر Fe، Co و Cr و ناحیه بین‌دندریتی غنی از عناصر Al، Ni و Ti و شامل فازهای NiAl و γ' در زمینه γ است. عملیات حرارتی همگن‌سازی، در دمای 1220°C درجه سلسیوس، فاز بین‌فلزی NiAl را حل کرده و ساختار دندریتی کاهش چشمگیری پیدا کرده و از پیوستگی ساختار دندریتی کاسته شده است. با انجام عملیات همگن‌سازی، عناصر Ni، Al و Ti از مناطق بین‌دندریتی به مناطق دندریتی و عناصر Cr و Fe از مناطق دندریتی به مناطق بین‌دندریتی نفوذ کرده‌اند.

۵- سپاسگزاری

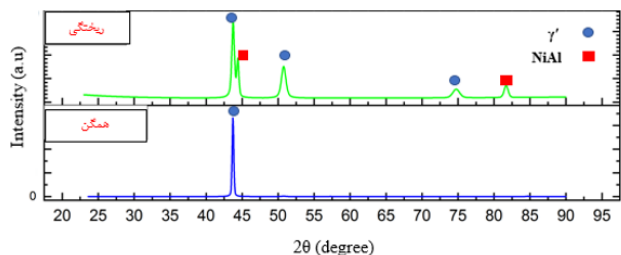
نویسندگان از محققان پژوهشکده مهندسی مواد دانشگاه صنعتی مالک اشتر، که در انجام دادن این پژوهش ما را یاری کرده‌اند، کمال قدردانی و تشکر را دارند.

مراجع

1. Asgarkhani, N., Seifollahi, M., & Abbasi, S. M. (2023). Effect of aging treatment on the microstructure and mechanical properties of $\text{Al}_{10.7}\text{CoCrFeNi}$ high entropy alloy. *International Journal of Engineering*, 36(6), 1060-1065. <https://doi.org/10.5829/IJE.2023.36.06C.04>
2. Brooks, C. R. (1984). *Heat treatment, structure, and properties of nonferrous alloys*. Metals Park: American Society Metals, ISBN: 978-0871701381
3. Daoud, H., Manzoni, A. M., Wanderka, N., & Glatzel, U. (2015). High-temperature tensile strength of $\text{Al}_{10}\text{Co}_{25}\text{Cr}_8\text{Fe}_{15}\text{Ni}_{36}\text{Ti}_6$ compositionally complex alloy (high-entropy alloy). *Journal of Materials*, 67(10), 2271-2277. <https://doi.org/10.1007/s11837-015-1484-7>
4. Durand-Charre, M. (2017). *The microstructure of superalloys*. Routledge. <https://doi.org/10.1201/9780203736388>
5. Ghaderi, A., Moghani Alghollandis, H., & Soltanlinezhad, M. (2019). Effect of annealing a microstructure and hardness of 10.5CoCrFeNi high entropy alloy. *8th imat*. Tehran: civilika. [IMES13_387](https://doi.org/10.1063/1.3587228)
6. 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. <https://doi.org/10.1063/1.3587228>
7. 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. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.12.143>

فاز γ' ترکیب بین‌فلزی با شبکه بلوری منظم $L1_2$ و پارامتر شبکه $3/56$ آنگستروم است که در آن اتم‌های Al در گوشه مکعب و اتم‌های Ni در مرکز وجوه قرار دارند و به صورت Ni_3Al نشان داده می‌شوند. اما، از آنجاکه مقدار زیادی از عنصر Ti می‌تواند به جای Al قرار گیرد، آن را به صورت $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$ نیز نمایش می‌دهند (Brooks, 1984). از آنجایی که هر دو فاز γ و γ' دارای شبکه یکسان با ثابت شبکه تقریباً مشابه هستند، می‌توان استنباط کرد که رسوبات γ' دارای فصل مشترک هم‌سیما 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 می‌شوند و نیازی به فوق‌تبرید بالایی ندارند (Brooks, ;Durand-Charre, 2017). جوانه‌زنی رسوبات γ' با استحاله منظم شدن رخ می‌دهد و در ادامه تحت کنترل نفوذ خواهد بود (Mitchell et al., 2008). همان‌طور که در بسیاری از سوپرآلیاژهای پایه نیکل نیز مشخص شده است، تشکیل فاز γ' در طول سردکردن اجتناب‌ناپذیر است. بنابراین، نمی‌توان یک محلول جامد همگن به دست آورد. از آنجایی که هدف اصلی در این عملیات حرارتی حذف و کاهش ساختار دندریتی و حذف فازهای غنی از Ti، Ni و NiAl بوده، این عملیات حرارتی مبنایی برای عملیات حرارتی پیرسازی بعدی به شمار می‌رود.

شکل ۷ الگوی پراش پرتو ایکس مربوط به آلیاژ آنتروپی بالای $\text{Al}_{10}\text{Co}_{25}\text{Cr}_8\text{Fe}_{15}\text{Ni}_{36}\text{Ti}_6$ را در شرایط ریختگی و همگن‌شده نشان می‌دهد. پیک‌های مشاهده‌شده در آنالیز پرتو ایکس در حالت ریختگی با فاز بین‌فلزی NiAl و فاز γ' مطابقت دارند. با انجام عملیات حرارتی همگن‌سازی در دمای 1220°C درجه سلسیوس، پیک‌های مطابق با فاز NiAl و برخی پیک‌های مطابق با فاز γ' حذف شده‌اند.



شکل ۷. الگوی پراش پرتو ایکس مربوط به آلیاژ آنتروپی بالای $\text{Al}_{10}\text{Co}_{25}\text{Cr}_8\text{Fe}_{15}\text{Ni}_{36}\text{Ti}_6$ در شرایط ریختگی و همگن‌شده

8. 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. <https://doi.org/10.1155/2015/647351>
9. 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. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2013.08.016>
10. Ma, L., Wan, J., Lai, Z., Wu, Z., Yang, B., & Zhao, P. (2023). Microstructure and mechanical property of Al56-xCo24Cr20Ni x eutectic high-entropy alloys with an ordered FCC/BCT phase structure. *Journal of Alloys and Compounds*, 936, 168-194. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.168194>
11. Manzoni, A. M., Haas, S., Yu, J. M., Daoud, H. M., Glatzel, U., Aboufadel, H., ... & Wanderka, N. (2019). Evolution of γ/γ' phases, their misfit and volume fractions in Al10Co25Cr8Fe15Ni36Ti6 compositionally complex alloy. *Materials Characterization*, 154, 363-376. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2019.06.009>
12. Manzoni, A. M., & Glatzel, U. (2019). New multiphase compositionally complex alloys driven by the high entropy alloy approach. *Materials Characterization*, 147, 512-532. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.06.036>
13. 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. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.04.098>
14. Munitz, A., Salhov, S., Hayun, S., & Frage, N. (2016). Heat treatment impacts the micro-structure and mechanical properties of AlCoCrFeNi high entropy alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 683, 221-230. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.05.034>
15. 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. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.144606>
16. Shi, Y., Collins, L., Feng, R., Zhang, C., Balke, N., Liaw, P. K., & Yang, B. (2018). Homogenization of AlxCoCrFeNi high-entropy alloys with improved corrosion resistance. *Corrosion Science*, 133, 120-131. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2018.01.030>
17. 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. <https://doi.org/10.1007/s11837-014-1085-x>
18. 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. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2022.107820>
19. 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. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.127314>
20. Zhang, K., & Fu, Z. (2012). Effects of annealing treatment on phase composition and microstructure of CoCrFeNiTiAlx high-entropy alloys. *Intermetallics*, 36(6), 24-32. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2011.10.010>
21. 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. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2013.10.001>