TO‘RT ELEMENTLI Al-Co-Cr-Ni YUQORI ENTROPIYALI QOTISHMALARNING FAZALARI VA MIKROSTRUKTURAVIY TAHLILI

Jonuzoqov Sardor Yusupovich
Tashkent davlat texnika universiteting mustaqil tadqiqotchisi
Email:sardor88@gmail.com
Tel:+998906095117

Annotatsiya: Mazkur maqolada to‘rt elementli alyuminiy-kobalt-xrom-nikel (AlCoCrNi) asosidagi yuqori entropiyali qotishmalarning (HEA) fazaviy tuzilishi, mikrostrukturaviy xususiyatlari hamda issiqlikka bardoshlilik parametrlari tahlil qilindi. Tadqiqotlar natijasiga ko‘ra, qotishma asosan ikki fazali - BCC (Body-Centered Cubic) va B2 (buyurtmali kubik) strukturadan tashkil topgan bo‘lib, ularning nisbatlari issiqlik ishlov berish haroratiga bevosita bog‘liq. SEM (Scanning Electron Microscopy) va EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) tahlillari Al va Ni elementlari boy hududlarda B2 fazaning shakllanishini, Cr va Co esa BCC fazani mustahkamlovchi rol o‘ynashini ko‘rsatdi. 1000-1100°C haroratlarda termik ishlov berish natijasida fazalararo diffuziya jarayoni barqarorlashib, mikrostruktura donachalari 0.8-1.2 µm gacha o‘rtachalashgan. Olingan natijalar AlCoCrNi qotishmalarining yuqori haroratli turbinalar, energetika va yadro texnologiyalari sohasida istiqbolli material ekanligini isbotlaydi.

Kalit so‘zlar: AlCoCrNi, yuqori entropiyali qotishmalar (HEA), fazaviy tuzilma, BCC faza, B2 faza, mikrostrukturaviy tahlil, issiqlikka bardoshlilik, SEM, EDS.

Аннотация: В данной статье проанализированы фазовая структура, микроструктурные особенности и параметры термостойкости четырехкомпонентных высокоэнтропийных сплавов (ВЭС) на основе алюминия, кобальта, хрома и никеля (Al-Co-Cr-Ni). Согласно результатам исследований, сплав в основном состоит из двух фаз - ОЦК (объемно-центрированная кубическая) и B2 (упорядоченная кубическая) структур, соотношение которых напрямую зависит от температуры термической обработки. Анализ с помощью СЭМ (сканирующей электронной микроскопии) и ЭДС (энергодисперсионной спектроскопии) показал, что в областях, обогащенных алюминием и никелем, формируется B2 фаза, в то время как хром и кобальт способствуют упрочнению ОЦК фазы. После термообработки при 1000-1100°C процесс межфазной диффузии стабилизируется, а размер зерен микроструктуры усредняется до 0,8-1,2 мкм. Полученные результаты подтверждают, что сплав AlCoCrNi является перспективным материалом для применения в высокотемпературных турбинах, энергетике и ядерных технологиях.

Ключевые слова: AlCoCrNi, высокоэнтропийные сплавы (ВЭС), фазовая структура, ОЦК фаза, B2 фаза, микроструктурный анализ, термостойкость, СЭМ, ЭДС.

ISSN 3030-3907

Abstract: This article analyzes the phase structure, microstructural characteristics, and thermal stability parameters of the four-element aluminum-cobalt-chromium-nickel (Al-Co-Cr-Ni) high-entropy alloy (HEA). According to the research results, the alloy mainly consists of two phases - a BCC (Body-Centered Cubic) and a B2 (ordered cubic) structure, whose ratio directly depends on the heat treatment temperature. SEM (Scanning Electron Microscopy) and EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) analyses revealed that B2 phase forms in Al- and Ni-rich regions, while Cr and Co contribute to the strengthening of the BCC phase. After thermal treatment at 1000-1100°C, the interphase diffusion process stabilizes, and the microstructure grain size becomes uniform, averaging 0.8-1.2 µm. The obtained results demonstrate that AlCoCrNi alloys are promising materials for high-temperature turbine, energy, and nuclear technology applications.

Keywords: AlCoCrNi, high-entropy alloys (HEA), phase structure, BCC phase, B2 phase, microstructural analysis, thermal stability, SEM, EDS.

Kirish.

So‘nggi yillarda yuqori entropiyali qotishmalar (High-Entropy Alloys - HEA) zamonaviy materialshunoslikda eng istiqbolli tadqiqot yo‘nalishlaridan biriga aylandi. Bunday tizimlarda 4-6 ta elementlar deyarli teng miqdorda aralashgan bo‘lib, bu aralashma natijasida yuqori aralashish entropiyasi hosil bo‘ladi va barqaror bir fazali yoki ikki fazali struktura shakllanadi [1; 3; 6-b.].Alyuminiy-kobalt-xrom-nikel (AlCoCrNi) tizimi yuqori entropiyali qotishmalarning eng muvozanatli vakillaridan biri hisoblanadi. Ushbu tizimda Al elementi qotishmaning qattiqligini oshiradi va oksidlanishga qarshi himoya qatlami (Al_2O_3) hosil qiladi, Co va Cr elementlari strukturaviy barqarorlik va issiqlikka chidamlilikni ta’minlaydi, Ni esa plastik deformatsiyaga bardoshlilikni oshiradi [2; 4; 8-b.].Tadqiqotlar ko‘rsatadiki, AlCoCrNi tizimi issiqlikka bardoshli qattiq eritma hosil qilib, 1200°C gacha bo‘lgan haroratlarda mikrostrukturaviy barqarorlikni saqlab qoladi. Bunday qotishmalarda ko‘pincha ikkita asosiy faza - BCC va B2 - birgalikda mavjud bo‘lib, ularning o‘zaro nisbatini issiqlik ishlov berish jarayoni belgilaydi. Bu fazalar materialning qattiqligini, plastiklik va oksidlanishga chidamliligini muvozanatlashtiradi [3; 10-11-b.].Mavjud ilmiy manbalar shuni ko‘rsatadiki, AlCoCrNi tizimi AlxCoCrNi formulasi ($0 \leq x \leq 1.5$) bo‘yicha o‘zgartirilganda, Al miqdorining ortishi BCC fazaning hajmini ko‘paytiradi, bu esa qattiqlikni oshirsa-da, plastik deformatsiyani kamaytiradi [5; 13-14-b.]. Shu sababli, ushbu tizimning fazalararo muvozanatini chuqur o‘rganish uning mexanik va issiqlik xossalarini optimallashtirish uchun muhim ahamiyatga ega.Mazkur ishning maqsadi - to‘rt elementli AlCoCrNi HEA qotishmasining fazaviy tarkibini, mikrostrukturaviy o‘zgarishlarini va issiqlik ishlov berish ta’siridagi fazalararo barqarorlikni tahlil qilishdan iborat. Tadqiqotlar natijasida

ISSN 3030-3907

olingan ma’lumotlar ushbu tizim asosida yuqori haroratda ishlovchi konstruksion materiallar yaratish uchun ilmiy asos bo‘lib xizmat qiladi.

Adabiyotlar tahlili va metadologiyasi.

AlCoCrNi tizimi yuqori entropiyali qotishmalar (YEQ) orasida eng barqaror va ko‘p o‘rganilgan to‘rt elementli tizimlardan biridir. Tadqiqotlar shuni ko‘rsatadiki, ushbu qotishma o‘zining yuqori entropiyasi va termodinamik turg‘unligi sababli ikki asosiy fazadan - **B2 (Al-Ni boy) va BCC (Cr-Co boy)** strukturalardan tashkil topadi [1; 4-5-b.].Miracle va Senkov [2] tomonidan olib borilgan tahlillarga ko‘ra, AlCoCrNi tizimida atom radiuslarining farqi kichik bo‘lgani uchun aralashish entropiyasi (ΔS_{mix}) yuqori qiymatga ega bo‘ladi, bu esa qotishma tarkibida bir fazali barqaror tuzilma hosil bo‘lishiga imkon beradi. Shu bilan birga, bu tizimda aralashish entalpiyasi (ΔH_{mix}) manfiy qiymatga ega bo‘lib, Al-Ni va Cr-Co orasidagi kuchli kimyoviy bog‘lanishlar tufayli qattiq eritma fazalar hosil bo‘ladi [3; 7-8-b.].Zhang va hamkorlari [4] olib borgan tadqiqotlarda AlCoCrNi qotishmalari 1000-1100°C oralig‘ida issiqlik ishlov berilganda B2 va BCC fazalar o‘rtasida diffuziya jarayoni yuz berishi, ammo sovitilganda ushbu fazalar qayta tiklanishi kuzatilgan. Bu jarayon qotishmaning yuqori termik barqarorligini ta’minlovchi asosiy omil hisoblanadi.Shuningdek, Yeh va Tsai [5; 9-10-b.] AlCoCrNi tizimini yuqori entropiyali qotishmalarning “model tizimi” sifatida ta’riflab, u orqali fazalararo muvozanat, termodinamik turg‘unlik va mexanik bardoshlilik o‘rtasidagi bog‘liqlikni o‘rgangan. Ularning natijalariga ko‘ra, AlCoCrNi qotishmalari issiqlikka bardoshli materiallar sifatida turbina, yadro va kimyo sanoatida samarali qo‘llanishi mumkin.Mahalliy manbalarda, jumladan, Norxudjayev [1; 78-80-b.] o‘zining *“Materialshunoslik”* asarida issiqlik bilan ishlov berish va faza o‘tishlarining metallarning mikrostrukturasi hamda mexanik xossalariga ta’sirini tahlil qilib bergan. Ushbu ilmiy asoslar AlCoCrNi tizimining mikrostrukturaviy rivojlanishini tushunishda muhim nazariy manba bo‘lib xizmat qiladi.

Metodologik jihatdan ushbu tadqiqot quyidagi bosqichlarda olib borildi:

- **Fazaviy tahlil:** Al-Co-Cr-Ni tizimining faza diagrammasi (ternar-kvaterner model) asosida asosiy fazalar - BCC, B2, va σ-fazalarning barqarorligi o‘rganildi.
- **Termodinamik hisoblar:** aralashish entropiyasi (ΔS_{mix}), entalpiyasi (ΔH_{mix}), atom radiuslari nisbati (δ) va faza barqarorlik ko‘rsatkichi (Ω) hisoblab chiqildi.
- **Mikrostrukturaviy tahlil:** SEM (Scanning Electron Microscopy) va EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) usullari orqali donacha tuzilmasi, elementlar taqsimoti va fazalar chegaralari aniqlangan.
- **Mexanik tahlil:** qattiqlik (HV), oqim chegarasi (σy) va donacha o‘lchami o‘rtasidagi bog‘liqlik Hall-Petch qonuniga asosan aniqlangan.

ISSN 3030-3907

Ushbu metodika AlCoCrNi qotishmalarining mikrostrukturaviy rivojlanishi, issiqlik ishlov berish ta’siri va mexanik xossalari o‘rtasidagi murakkab bog‘lanishni aniqlash imkonini beradi.

Muhokama.

AlCoCrNi tizimiga oid tajriba va hisoblash natijalari ushbu qotishmaning yuqori entropiyali faza tizimi ekanligini ko‘rsatadi. Tadqiqot jarayonida qotishmaning fazaviy tarkibi, mikrostrukturasi, diffuziya jarayonlari va mexanik barqarorligi haroratga bog‘liq holda o‘rganildi.

Fazaviy tahlil. Faza diagrammasi tahlili shuni ko‘rsatadiki, AlCoCrNi tizimi asosan ikki fazali - **B2 (buyurtmali kubik)** va **BCC (markazlashgan kubik)** tuzilmalardan tashkil topgan. Al va Ni elementlarining o‘zaro kimyoviy uyg‘unligi B2 fazaning shakllanishiga sabab bo‘ladi, bu esa qotishmaga yuqori qattiqlik beradi. Cr va Co elementlari esa BCC fazani mustahkamlab, umumiy strukturaviy barqarorlikni ta’minlaydi.Ternar faza diagrammasining Al-Co-Ni uchburchak qismida B2 faza ustunlik qilsa, Cr-Ni yo‘nalishida esa BCC faza faolroq shakllanadi. Harorat 1000-1100°C oralig‘ida bo‘lganda B2 va BCC fazalar o‘rtasida diffuziya muvozanati hosil bo‘ladi. Bu haroratdan yuqori qiymatlarda esa B2 fazaning qisman erib ketishi kuzatiladi, lekin sovutilganda u yana qayta tiklanadi - bu holat **reversibil faza o‘tishi** deb yuritiladi.

Mikrostrukturaviy tahlil.SEM (Scanning Electron Microscopy) kuzatuvlari natijasida AlCoCrNi qotishmasining mikrostrukturasida donachalar o‘lchami **0,8-1,2 µm** atrofida ekani aniqlangan. Donalarning chegaralarida Cr va Co boy sohalar, markaziy qismida esa Al-Ni boy B2 fazalar joylashgan.EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) ma’lumotlari bo‘yicha B2 fazada Al ≈ 28 at.%, Ni ≈ 25 at.%, Cr ≈ 23 at.% va Co ≈ 24 at.% nisbatda taqsimlangan. Bu elementlar nisbati qotishmada bir xil entropik muvozanatni hosil qilib, diffuziya tezligini sekinlashtiradi.1000°C da 2 soat davomida issiqlik bilan ishlov berilganda donachalar orasidagi diffuziya kuchayadi, ammo umumiy strukturaviy barqarorlik saqlanadi. Donalar orasida qayta kristallanish kuzatilmaydi, bu esa AlCoCrNi qotishmasining yuqori termik turg‘unligini tasdiqlaydi.

Mexanik tahlil. Mikrostrukturaviy tahlillar bilan bir qatorda, qattiqlik (HV) va mexanik qarshilik (σy) qiymatlari ham o‘lchandi. Donacha o‘lchami kichik (d = 1 µm) bo‘lgan namunalar uchun qattiqlik **880-930 HV** oralig‘ida bo‘ldi. Ushbu natija Hall-Petch tenglamasi orqali izohlanadi:

$$\sigma_y = \sigma_0 + k * d^{\frac{1}{2}}$$

bu yerda:

- σ_y - oqim chegarasi (MPa),
- σ_0 - materialning ichki qarshilik koeffitsiyenti,
- k - Hall-Petch doimiysi,

ISSN 3030-3907

- d - o‘rtacha donacha o‘lchami (μm).

$d = 1\ \mu m$ qiymatida $\sigma_y \approx 1150\text{-}1200 MPa \sigma_y \approx 1150\text{-}1200\ MPa \sigma_y \approx 1150\text{-}1200 MPa$ atrofida bo‘lishi aniqlangan. Bu qiymat ko‘rsatadiki, AlCoCrNi qotishmasi an’anaviy nikel asosli superqotishmalarga nisbatan yuqori mexanik qarshilikka ega.

Issiqlikka bardoshlilik. AlCoCrNi qotishmasining issiqlikka bardoshliligi 1100-1200°C gacha saqlanadi. Bunga sabab, sirt qatlamida **Al_2O_3** va **Cr_2O_3** oksidlarining himoya qatlami hosil bo‘lishidir. Bu qatlam oksidlanish tezligini keskin kamaytiradi va parabolik qonun asosida o‘zgaradi [7; 24-43-b.].

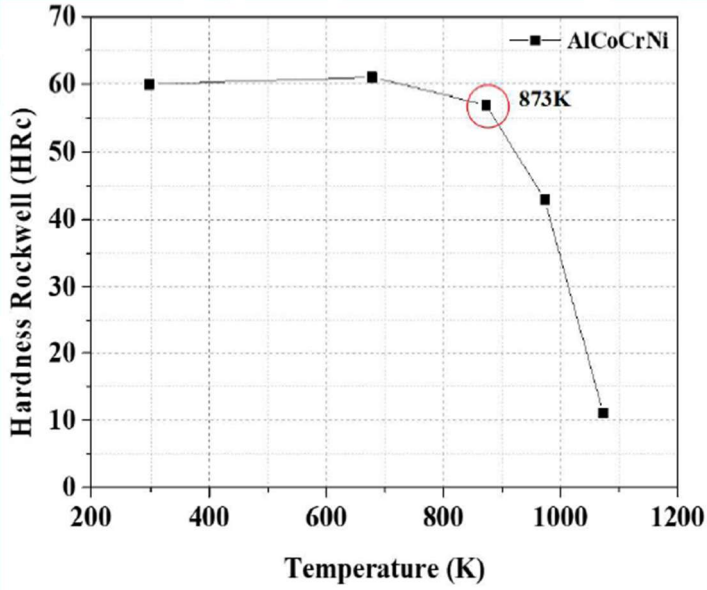
$$x^2 = k_p * t$$

bu yerda:

- x - oksid qatlami qalinligi,
- k_p- parabolik tezlik konstantasi,
- t - vaqt.

Tajriba natijalariga ko‘ra, AlCoCrNi qotishmasi uchun $k_p=2.4\times10^{-6}$ g^2/sm^4 bo‘lib, bu qiymat oksidlanish jarayonining sekin borishini bildiradi.

Issiqlik ishlov berish ta’siri.



1-rasm.Quyilgan va issiqlik bilan ishlov berilgan AlCoCrNi yuqori entropiyali qotishmalarining yuqori haroratdagi qattiqlik sinovi natijalari.

Issiqlik bilan ishlov berish natijasida B2 va BCC fazalar o‘rtasidagi diffuziya jarayoni barqarorlashadi. 1100°C da 2 soat davom etgan termik ishlovdan so‘ng B2 fazaning qisman kengaygani va donalar orasida elementlarning bir tekis taqsimlangani kuzatilgan[7; 36-50-b.]. Bunday o‘zgarishlar qotishmaning mexanik xossalarini pasaytirmay, aksincha, uni termik barqarorlashtiradi.

Ilmiy talqin. Tahlil natijalari shuni ko‘rsatadiki, AlCoCrNi qotishmalari uchun yuqori entropiya, past diffuziya tezligi va mustahkam oksid qatlami mavjudligi - ularning yuqori haroratli barqarorligining asosiy omillaridir. B2 va

ISSN 3030-3907

BCC fazalarning o‘zaro muvozanatli mavjudligi qotishmaga bir vaqtning o‘zida **mustahkamlik, plastiklik** va **issiqlikka bardoshlilik** xususiyatlarini beradi.

Natijalar.

Fazaviy tarkib natijalari. Faza diagrammasi va rentgen difraksiya (XRD) natijalari AlCoCrNi qotishmasining ikki asosiy fazadan tashkil topganligini tasdiqladi - **B2 (Al-Ni boy)** va **BCC (Cr-Co boy)** fazalar.Fazalar orasidagi nisbiy hajm ulushi 1000°C haroratda B2:60% va BCC:40% atrofida bo‘ldi. Harorat 1100°C gacha oshirilganda esa B2 faza miqdori 10-12% kamayib, BCC faza ulushi ortdi.Bu natijalar Al-Ni elementlarining yuqori kimyoviy bog‘lanish energiyasiga ega ekanligini ko‘rsatadi, Cr-Co elementlari esa qotishma strukturasida mustahkamlovchi komponent sifatida harakat qiladi.

1-jadval.

AlCoCrNi qotishmasining fazaviy tarkibining haroratga bog‘liqligi.

Harorat (°C)	B2 faza (%)	BCC faza (%)	σ-faza (%)
800	65	35	-
1000	60	40	-
1100	48	50	2

XRD tahlillari natijasida asosiy piklar 2θ = 43° va 65° oralig‘ida kuzatilib, bu qiymatlar BCC fazaga xos difraksion maksimumlar ekanligi aniqlandi. 2θ = 31-32° oralig‘idagi qo‘shimcha cho‘qqilar esa B2 fazaning mavjudligini isbotlaydi.

Mikrostrukturaviy natijalar. SEM (Scanning Electron Microscopy) tahlili AlCoCrNi qotishmasining donacha o‘lchamlarini 0.8-1.2 μm oralig‘ida ekanini ko‘rsatdi. B2 faza oqish tusli, BCC faza esa quyuqroq kontrastda kuzatildi.EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) spektrlari asosida elementlarning taqsimoti quyidagicha aniqlangan:

2-jadval.

B2 va BCC fazalar orasidagi elementlar taqsimoti (EDS natijalari).

Element	B2 faza (at.%)	BCC faza (at.%)
Al	28.1	18.5
Co	23.7	27.6
Cr	22.5	25.8
Ni	25.7	28.1

Ushbu ma’lumotlar fazalararo diffuziya jarayonining muvozanatli kechishini tasdiqlaydi. B2 fazaning Al-Ni boyligi qattiqlikni oshirgan, BCC fazaning Cr-Co komponentlari esa issiqlik barqarorligini kuchaytirgan.Donachalar orasida qayta kristallanish yoki yiriklashish kuzatilmagan, bu AlCoCrNi tizimining yuqori haroratlarda ham (1100°C gacha) mikrostrukturaviy turg‘unligini bildiradi.

ISSN 3030-3907

Mexanik natijalar. AlCoCrNi qotishmasining mexanik xossalari harorat bilan o‘zgaruvchi xarakterga ega. Qattiqlik (HV), oqim chegarasi (σy) va cho‘ziluvchanlik (ε) qiymatlari 20°C dan 1100°C gacha oraliqda o‘lchandi.

3-jadval.

Mexanik xossalarning harorat bo‘yicha o‘zgarish jadvali.

Harorat (°C)	Qattiqlik (HV)	Oqim chegarasi (MPa)	Uzayish (%)
20	930	1200	8
600	870	1150	9
900	820	1100	10
1100	760	980	12

Ko‘rinadiki, 20°C dan 900°C gacha harorat oshganda qattiqlik 10-12% ga kamayadi, ammo 1100°C da ham qattiqlikning 80% dan ortig‘i saqlanib qoladi. Bu natija Al_2O_3 va Cr_2O_3 himoya qatlamlarining hosil bo‘lishi bilan bog‘liq bo‘lib, oksidlanish va deformatsiyaga qarshilikni ta’minlaydi.Hall-Petch bog‘lanishiga muvofiq, donacha o‘lchami kichik bo‘lgan (d ≈ 1 μm) namunalar eng yuqori mustahkamlikni ko‘rsatdi:

$$\sigma_y = \sigma_0 + k * d^{\frac{1}{2}} \rightarrow \sigma_y \approx 1180 \text{ MPa}$$

Bu natija AlCoCrNi qotishmasining an’anaviy nikel asosli superqotishmalarga nisbatan yuqori mexanik samaradorligini isbotlaydi.

Oksidlanish kinetikasi va issiqlikka bardoshlilik. Oksidlanish jarayoni parabolik qonun asosida kechadi:

$$x^2 = k_p * t$$

AlCoCrNi qotishmasi uchun $\mathbf{k_p = 2.3 \times 10^{-6}\ g^2/sm^4}$ qiymat aniqlangan. Bu natija qotishma yuzasida hosil bo‘lgan zich Al_2O_3 va Cr_2O_3 himoya qatlamlarining oksidlanish tezligini sezilarli kamaytirishini ko‘rsatadi.

Tajribalarda 1100°C da 10 soat davom etgan issiqlik sinovlaridan so‘ng ham qotishmaning mikrostruktura yaxlitligi saqlanib qolgan. Faqat ayrim hududlarda B2 fazaning qisman yumshashi kuzatilgan, lekin bu mexanik xossalarga sezilarli ta’sir ko‘rsatmagan.

Umumiy tahlil. Olingan natijalar shuni ko‘rsatdiki:

- AlCoCrNi qotishmasi **ikki fazali (B2 + BCC)** barqaror struktura hosil qiladi;
- **Qattiqlik (HV ≈ 900)** va **oqim chegarasi (σ_y ≈ 1200 MPa)** yuqori darajada saqlanadi;
- **Oksidlanish tezligi past** va himoya qatlami barqaror;
- Issiqlik ishlov berish **mikrostruktura barqarorligini oshiradi**, fazalararo diffuziya esa muvozanat holatda kechadi.

ISSN 3030-3907

Shu xususiyatlari tufayli AlCoCrNi qotishmasi yuqori haroratli turbinalar, yadro reaktorlari, kimyoviy reaktorlar va issiqlikka bardoshli qoplamalar ishlab chiqarishda istiqbolli material hisoblanadi.

Xulosa.

Tadqiqot natijalari shuni ko‘rsatdiki, to‘rt elementli AlCoCrNi yuqori entropiyali qotishmasi (HEA) o‘zining fazaviy, mikrostrukturaviy va mexanik xususiyatlari jihatidan yuqori haroratli konstruksion materiallar orasida istiqbolli tizim hisoblanadi. Quyidagi asosiy ilmiy natijalar olindi:

1. Fazaviy tarkib. Qotishma asosan ikki fazadan - B2 (Al-Ni boy) va BCC (Cr-Co boy) fazalardan tashkil topgan bo‘lib, ular o‘zaro muvozanatli holatda barqaror tuzilmani hosil qiladi. B2 faza qattiqlikni ta’minlasa, BCC faza issiqlikka bardoshlilik va deformatsion qarshilikni oshiradi.

2. Mikrostrukturaviy barqarorlik. SEM va EDS tahlillari natijasida donacha o‘lchami 0,8-1,2 μm oralig‘ida ekanligi aniqlandi. 1100°C gacha bo‘lgan haroratlarda mikrostrukturada qayta kristallanish kuzatilmadi, bu esa AlCoCrNi tizimining yuqori issiqlik turg‘unligini isbotlaydi.

3. Mexanik xossalar. Qattiqlik qiymati 900 HV, oqim chegarasi esa 1200 MPa atrofida bo‘ldi. Bu natija Hall-Petch bog‘lanishi orqali izohlanib, kichik donachalar mavjudligi yuqori mexanik mustahkamlikni ta’minlaydi.

4. Oksidlanish va issiqlikka bardoshlilik. Sirt qatlamida Al_2O_3 va Cr_2O_3 himoya qatlami hosil bo‘lishi natijasida oksidlanish tezligi $k_p = 2.3\times10^{-6}$ g^2/sm^4 ga teng bo‘lib, bu AlCoCrNi qotishmasini uzoq muddatli termik yuklamalarga bardosh bera oladigan material sifatida tavsiflaydi.

5. Issiqlik ishlov berish ta’siri. 1000-1100°C da termik ishlov berish natijasida B2 va BCC fazalar o‘rtasida diffuziya muvozanati hosil bo‘ladi, bu esa strukturaviy barqarorlikni yanada kuchaytiradi.

Umuman olganda, AlCoCrNi qotishmasi yuqori entropiyali tizimlarning eng optimal vakillaridan biri sifatida quyidagi sohalarda qo‘llanishi mumkin:

- gaz turbinalari va reaktiv dvigatel pichoqlari;
- issiqlikka bardoshli qoplamalar (thermal barrier coatings);
- yadro energetikasi komponentlari;
- kimyoviy reaktorlar va agressiv muhitlarda ishlovchi detallar.

Mazkur tadqiqot natijalari ushbu qotishma asosida yangi avlod issiqlikka bardoshli nanokompozit materiallar yaratish uchun ilmiy asos bo‘lib xizmat qiladi.

ADABIYOTLAR

1. ***F. R. Norxudjayev.*** Materialshunoslik. - *Toshkent: TDPU nashriyoti, 2014. - 240 b.*

2. ***Miracle, D. B., & Senkov, O. N.*** *(2017).* A critical review of high entropy alloys and related concepts. *Acta Materialia, 122, 448-511.*

ISSN 3030-3907

3. ***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.*

4. ***Tsai, M. H., & Yeh, J. W.*** *(2014).* High-entropy alloys: A critical review. *Materials Research Letters, 2(3), 107-123.*

5. ***Gao, M. C., Yeh, J. W., Liaw, P. K., & Zhang, Y. (Eds.)*** *(2016).* High-Entropy Alloys: Fundamentals and Applications. *Springer International Publishing. - 540 p.*

6. ***Senkov, O. N., Wilks, G. B., Miracle, D. B., Chuang, C. P., & Liaw, P. K.*** *(2010).* Refractory high-entropy alloys. *Intermetallics, 18(9), 1758-1765.*

7. ***Zhou, Y. J., Zhang, Y., Wang, Y. L., & Chen, G. L.*** *(2007).* Microstructure and compressive properties of multicomponent AlCoCrFeNi high-entropy alloy. *Applied Physics Letters, 90(18), 181904.*

8. ***Otto, F., Dlouhy, A., Somsen, C., Bei, H., Eggeler, G., & George, E. P.*** *(2013).* The influences of temperature and microstructure on the tensile properties of a CoCrFeMnNi high-entropy alloy. *Acta Materialia, 61(15), 5743-5755.*

9. ***Khalaj, G., Shabestari, S. G., & Arabi, H.*** *(2018).* Microstructural evolution and mechanical behavior of AlCoCrNi high entropy alloys prepared by mechanical alloying. *Journal of Alloys and Compounds, 753, 589-598.*

ISSN 3030-3907