

## ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ І ТЕРМОЕРС ВИСОКОЕНТРОПІЙНИХ СПЛАВІВ СИСТЕМИ AlCoCrCuFeNi У РІДКОМУ СТАНІ

М. Дуфанець, Ю. Плевачук<sup>ORCID</sup>, В. Склярчук<sup>ORCID</sup>  
Львівський національний університет імені Івана Франка  
вул. Кирила і Мефодія, 8, Львів, 79005, Україна

(Отримано 04 серпня 2021 р.; в остаточному вигляді — 08 вересня 2021 р.; прийнято до друку — 08 вересня 2021 р.; опубліковано онлайн — 28 вересня 2021 р.)

Проведено експериментальні вимірювання електропровідності та термоЕРС і проаналізовано поведінку й температурні залежності цих характеристик у розплавах еквіатомних концентрацій  $Al_{16.6}Co_{16.6}Cr_{16.6}Cu_{16.6}Fe_{16.6}Ni_{16.6}$ ,  $Al_{20}Co_{20}Cu_{20}Fe_{20}Ni_{20}$ ,  $Al_{25}Co_{25}Cu_{25}Fe_{25}$ ,  $Al_{25}Co_{25}Cr_{25}Ni_{25}$ ,  $Co_{20}Cr_{20}Cu_{20}Fe_{20}Ni_{20}$  у широкому інтервалі від плавлення до 1750 К.

**Ключові слова:** високоентропійні сплави, електропровідність, термоЕРС.

DOI: <https://doi.org/10.30970/jps.25.3601>

### І. ВСТУП

Більшість промислових сплавів є здебільшого термодинамічно нестабільними і, за зростання температури, в них можуть відбуватися фазові переходи, що призводить до погіршення експлуатаційних характеристик. У таких сплавах зазвичай утворюється низка інтерметалевих сполук, що є причиною крихкості. Високоентропійні сплави мають високу ентропію змішування, що досягається внаслідок збільшення кількості складових елементів (5 і більше), концентрація яких може змінюватися від 5 до 35 ат. % [1–3]. Такі сплави складаються з твердих розчинів (проста кристалічна структура ОЦК, ГЦК) і мають поліпшені механічні властивості. Стабілізація однофазового твердого розчину й запобігання утворенню інтерметалевих сполук у процесі кристалізації забезпечується високою ентропією змішування в початковому рідкому стані. Під час формування твердого розчину ентропія зростає зі збільшенням кількості елементів відповідно до гіпотези Больцмана. І навпаки, інтерметалеві сполуки мають упорядковану фазу, низьку конфігураційну ентропію, а за стехіометричного складу їхня ентропія взагалі дорівнює нулеві. Ці сплави характеризуються сповільненими значеннями дифузії та ефектом перемішування, високими твердістю й зносостійкістю, стійкістю до окислення, а також високими корозійною й радіаційною стійкістю, що дозволяє значно розширити сферу їх застосування.

На сьогодні багатокомпонентні високоентропійні еквіатомні або близькі до еквіатомних сплави вивчені недостатньо. Здебільшого досліджували фазовий склад, мікроструктурні й морфологічні особливості деяких різних за хімічним складом литих високоентропійних сплавів. Для цього використовували насамперед методи сканувальної електронної мікроскопії, рентгеноструктурного аналізу, рентгенівської спектроскопії, а також вимірювання деяких фізико-механічних властивостей. Суттєво стримує розвиток фундаментальних уявлень про високоентропійні сплави, а також не дає змоги знайти нові сфери пра-

ктичного застосування відсутність єдиної думки про природу явищ та фізичних процесів у цих сплавах, їхню структуру в рідкому стані та її трансформацію під час охолодження, а також механізми та послідовності структурнофазових перетворень під час кристалізації.

У рідкому стані відбувається формування атомарних розчинів, і тому саме в цьому початковому випадку зародження структури найлегше впливати на неї та змінювати в потрібному напрямі. Дослідження таких багатокомпонентних систем надзвичайно складне, тому інформація про властивості їхніх підсистем із меншою кількістю компонентів, що можуть розглядатися як модельні системи, є необхідною як для подальшого вивчення характеристик сплавів, так і для їх промислового виготовлення. Такі дослідження структурно-чутливих властивостей проводили для підсистем низькотемпературних високоентропійних сплавів [4–7], однак структурно-чутливі характеристики промислово перспективних високотемпературних сплавів все ще вивчені недостатньо.

Одними з найперспективніших таких сплавів є, зокрема, сплави системи AlCoCrCuFeNi, які поряд із характеристиками, типовими для металевих сплавів, мають унікальні та незвичайні властивості, характерні, наприклад, для металокерамік: високу твердість і стійкість до температурного руйнування, дисперсійне твердіння, позитивний температурний коефіцієнт зміцнення та високий рівень міцності за підвищених температур, зносостійкість, корозійну стійкість і низьку інших характеристик [8–11].

Як недавно встановлено, структура сплавів шести-компонентної системи AlCoCrCuFeNi має двофазовий характер і містить тверді розчини з ОЦК (тип A2 та B2) та ГЦК ґраткою (A1) [12]. У таких сплавах відбувається розпад із виділенням в ОЦК матриці низки нанорозмірних багатокомпонентних фаз переважно пластинчатої й рівновісної морфології, атомно впорядкованих (B2, L1) і розупорядкованих (A2) з різним хімічним складом. Крім того, у них наявні періодичні флуктуації концентрації й сегрегації хі-



мічних елементів (кластери розміром порядку одиниць нанометрів), які містять різні комбінації елементів. Усі виявлені в них нанофази, як і кластери, є багатокомпонентними твердими розчинами, зокрема, атомно-впорядкованими і збагаченими декількома елементами на основі систем  $Al_{25}Co_{25}Cu_{25}Ni_{25}$ ,  $Al_{25}Co_{25}Fe_{25}Ni_{25}$ ,  $Co_{33,3}Fe_{33,3}Cr_{33,3}$ , просторовий розподіл яких характеризується вираженою наномодуляцією елементного й фазового складу за об'ємом сплаву.

У роботі експериментально виміряно електропровідність та термоЕРС сплавів  $Al_{16,6}Co_{16,6}Cr_{16,6}Cu_{16,6}Fe_{16,6}Ni_{16,6}$ ,  $Al_{20}Co_{20}Cu_{20}Fe_{20}Ni_{20}$ ,  $Al_{25}Co_{25}Cu_{25}Fe_{25}$ ,  $Al_{25}Co_{25}Cr_{25}Ni_{25}$ ,  $Co_{20}Cr_{20}Cu_{20}Fe_{20}Ni_{20}$  еквіатомних концентрацій у широкому інтервалі температур рідкого стану від температур плавлення до 1750 К.

## II. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

Комплексні вимірювання електропровідності  $\sigma$  (відносна похибка вимірювань — 2 %) і термоЕРС  $\alpha$  (відносна похибка вимірювань — 5 %) проводили в атмосфері аргону під тиском до 10 МПа, щоб забезпечити сталий хімічний склад розплаву за високих температур. Електропровідність вимірювали контактним методом за 4-точковою схемою. Для експериментів використано циліндричні багатозонні комірки з нітриду бору, виготовлені у формі вертикальних контейнерів із внутрішньою робочою порожниною висотою 60 мм і діаметром 3.5 мм [13]. Застосування такої комірки дозволяє вилучити з результатів експерименту складники похибки вимірювання контактних е.р.с., а також похибки, що виникає внаслідок проникнен-

ня досліджуваного розплаву в керамічний корпус комірки. Високотемпературна піч із трьома незалежно контрольованими нагрівними елементами дозволяла підтримувати рівномірне температурне поле в межах 0.2–0.3 К у вимірюваному інтервалі температур.

Вимірювали термоЕРС за стандартною методикою, що дозволяє швидкий перехід від рівномірного температурного поля під час вимірів електропровідності до створення різниці температури 10–20 К уздовж зразка [14]. Температуру визначали за допомогою вольфрам-ренієвих термопар WRe5/20. Спай термопари розташовано в об'ємі графіту з метою її захисту від агресивного середовища розплаву. Окремі електроди термопари використовували як потенціальні зонди для вимірювання електропровідності.

## III. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Залежності електропровідності та термоЕРС від температури сплавів  $Al_{16,6}Co_{16,6}Cr_{16,6}Cu_{16,6}Fe_{16,6}Ni_{16,6}$ ,  $Al_{20}Co_{20}Cu_{20}Fe_{20}Ni_{20}$ ,  $Al_{25}Co_{25}Cu_{25}Fe_{25}$ ,  $Al_{25}Co_{25}Cr_{25}Ni_{25}$ ,  $Co_{20}Cr_{20}Cu_{20}Fe_{20}Ni_{20}$  визначали під час нагрівання від температур плавлення до 1750 К та протягом подальшого охолодження.

Експериментальні результати вимірювання електропровідності окремих розплавів показано на рисунках 1–5. Електропровідність усіх досліджених розплавів зменшується в дослідженому температурному діапазоні. У сплавах, що містять алюміній, значення електропровідності є в межах 13000–13700  $\text{Om}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ . Виняток становить сплав  $Co_{20}Cr_{20}Cu_{20}Fe_{20}Ni_{20}$ , електропровідність якого помітно нижча (11500–11600  $\text{Om}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ ), що зумовлено відсутністю Al, елемента з високою провідністю.

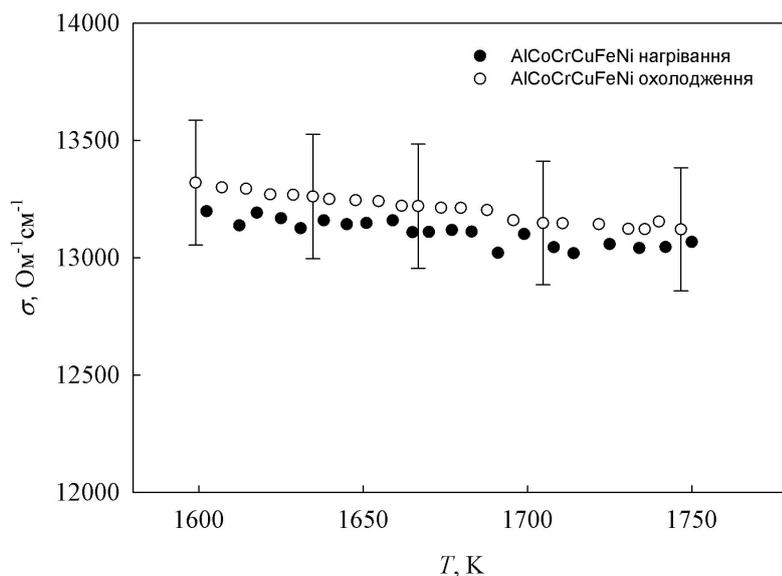


Рис. 1. Залежність електропровідності від температури розплаву  $Al_{16,6}Co_{16,6}Cr_{16,6}Cu_{16,6}Fe_{16,6}Ni_{16,6}$   
 Fig. 1. Electrical conductivity vs. temperature for  $Al_{16,6}Co_{16,6}Cr_{16,6}Cu_{16,6}Fe_{16,6}Ni_{16,6}$  liquid alloy

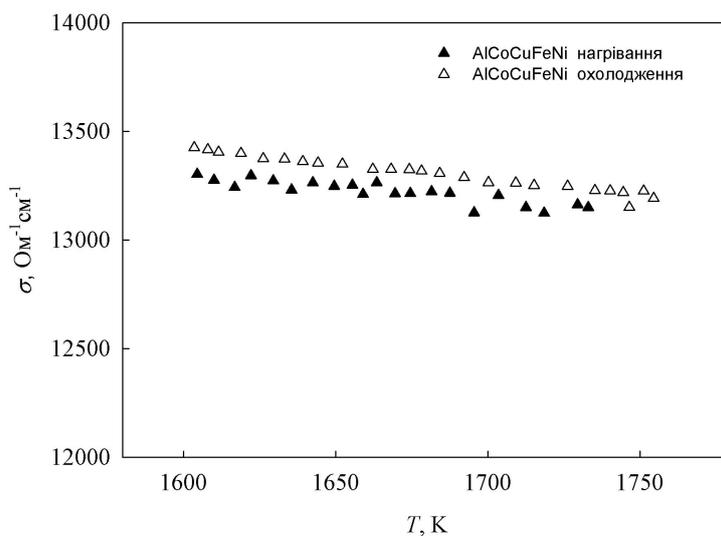


Рис. 2. Залежність електропровідності від температури розплаву Al<sub>20</sub>Co<sub>20</sub>Cu<sub>20</sub>Fe<sub>20</sub>Ni<sub>20</sub>  
 Fig. 2. Electrical conductivity vs. temperature for Al<sub>20</sub>Co<sub>20</sub>Cu<sub>20</sub>Fe<sub>20</sub>Ni<sub>20</sub> liquid alloy

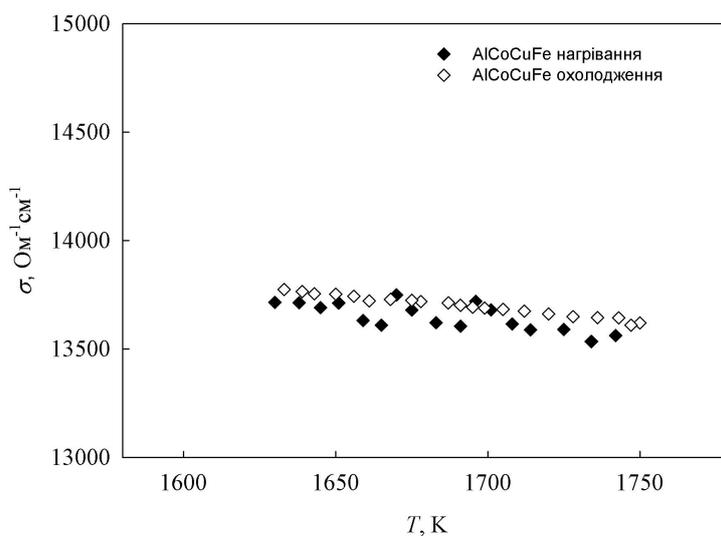


Рис. 3. Залежність електропровідності від температури розплаву Al<sub>25</sub>Co<sub>25</sub>Cu<sub>25</sub>Fe<sub>25</sub>  
 Fig. 3. Electrical conductivity vs. temperature for Al<sub>25</sub>Co<sub>25</sub>Cu<sub>25</sub>Fe<sub>25</sub> liquid alloy

Хімічний склад, ат. %	T <sub>m</sub> , K	σ <sub>0</sub> , Ом <sup>-1</sup> ·см <sup>-1</sup>	dσ/dT, Ом <sup>-1</sup> ·см <sup>-1</sup> ·К <sup>-1</sup>
Al <sub>16.6</sub> Co <sub>16.6</sub> Cr <sub>16.6</sub> Cu <sub>16.6</sub> Fe <sub>16.6</sub> Ni <sub>16.6</sub>	1596	13313	-1.3364
Al <sub>20</sub> Co <sub>20</sub> Cu <sub>20</sub> Fe <sub>20</sub> Ni <sub>20</sub>	1598	13428	-1.4862
Al <sub>25</sub> Co <sub>25</sub> Cu <sub>25</sub> Fe <sub>25</sub>	1626	13782	-1.2821
Al <sub>25</sub> Co <sub>25</sub> Cr <sub>25</sub> Ni <sub>25</sub>	1660	13377	-1.5712
Co <sub>20</sub> Cr <sub>20</sub> Cu <sub>20</sub> Fe <sub>20</sub> Ni <sub>20</sub>	1647	11764	-1.6933

Табл. 1. Параметри апроксимації, використані в рівнянні (1)  
 Table 1. Approximation parameters used in equation (1)

У всіх сплавах спостерігається незначна розбіжність між кривими нагрівання й охолодження, яка, однак, не виходить за межі експериментальної похибки 2 %. Розкид експериментальних точок під час нагрівання зумовлений структурними перетвореннями, що відбуваються після плавлення до досягнення розплавом гомогенного стану.

На рисунку 6 зображено залежності  $\sigma(T)$  досліджених розплавів під час охолодження, що добре апроксимуються лінійним поліномом

$$\sigma(T) = \sigma_0 + \frac{d\sigma}{dT}(T - T_m), \quad (1)$$

де  $T_m$  — температура плавлення, яка визначається з вимірювань електропровідності під час охолодження,  $\sigma_0$  — значення електропровідності за  $T_m$ ,  $d\sigma/dT$  — температурний коефіцієнт електропровідності. Параметри апроксимації, що використовуються в рівнянні (1), наведені в табл. 1.

Залежність термоЕРС від температури пока-

зано на рис. 7. Як видно з рис. 7, термоЕРС,  $\alpha(T)$  усіх досліджених сплавів є від'ємною та лінійно зменшується за абсолютними значеннями за умови підвищення температури. У розплаві  $\text{Al}_{25}\text{Co}_{25}\text{Cu}_{25}\text{Fe}_{25}$  абсолютні значення термоЕРС відносно невеликі й становлять приблизно  $3 \text{ мкВ}\cdot\text{К}^{-1}$ . У розплавах  $\text{Al}_{16.6}\text{Co}_{16.6}\text{Cr}_{16.6}\text{Cu}_{16.6}\text{Fe}_{16.6}\text{Ni}_{16.6}$ ,  $\text{Al}_{20}\text{Co}_{20}\text{Cu}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{20}$ ,  $\text{Co}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Cu}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{20}$  термоЕРС набуває значень на рівні  $8\text{--}11 \text{ мкВ}\cdot\text{К}^{-1}$ , а в розплаві  $\text{Al}_{25}\text{Co}_{25}\text{Cr}_{25}\text{Ni}_{25}$ , у якому відсутня мідь, є помітно вищою за абсолютним значенням ( $17 \text{ мкВ}\cdot\text{К}^{-1}$ ). Залежність термоЕРС від температури добре описується лінійним рівнянням:

$$\alpha(T) = \alpha_0 + \frac{d\alpha}{dT}(T - T_m), \quad (2)$$

де  $\alpha_0$  — термоЕРС за  $T_m$ ,  $d\alpha/dT$  — температурний коефіцієнт термоЕРС, значення яких наведені в табл. 2.

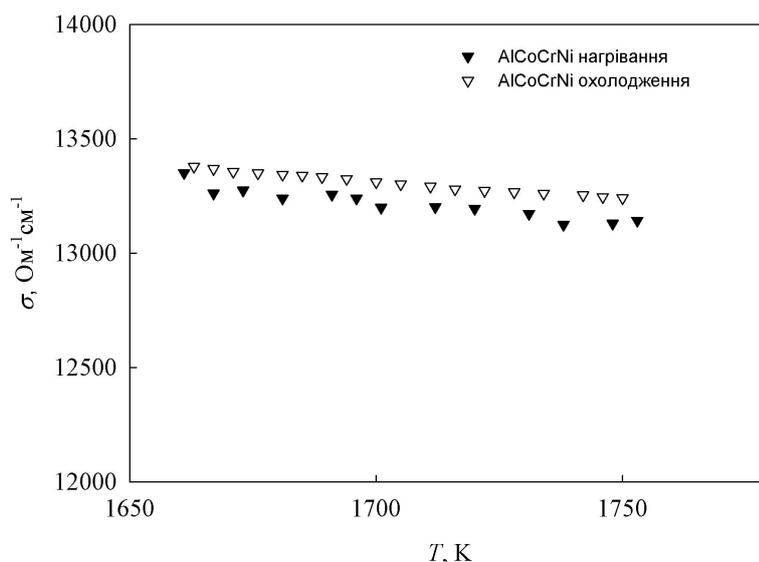


Рис. 4. Залежність електропровідності від температури розплаву  $\text{Al}_{25}\text{Co}_{25}\text{Cr}_{25}\text{Ni}_{25}$   
 Fig. 4. Electrical conductivity vs. temperature for  $\text{Al}_{25}\text{Co}_{25}\text{Cr}_{25}\text{Ni}_{25}$  liquid alloy

Хімічний склад, ат. %	$T_m$ , К	$\alpha_0$ , $\text{мкВ}\cdot\text{К}^{-1}$	$d\alpha/dT$ , $\text{мкВ}\cdot\text{К}^{-2}$
$\text{Al}_{16.6}\text{Co}_{16.6}\text{Cr}_{16.6}\text{Cu}_{16.6}\text{Fe}_{16.6}\text{Ni}_{16.6}$	1596	-9,64	0,0072
$\text{Al}_{20}\text{Co}_{20}\text{Cu}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{20}$	1598	-10,66	0,0078
$\text{Al}_{25}\text{Co}_{25}\text{Cu}_{25}\text{Fe}_{25}$	1626	-3,46	0,0072
$\text{Al}_{25}\text{Co}_{25}\text{Cr}_{25}\text{Ni}_{25}$	1660	-17,88	0,0073
$\text{Co}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Cu}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{20}$	1647	-7,49	0,0081

Табл. 2. Параметри апроксимації, використані в рівнянні (2)  
 Table 2. Approximation parameters used in equation (2)

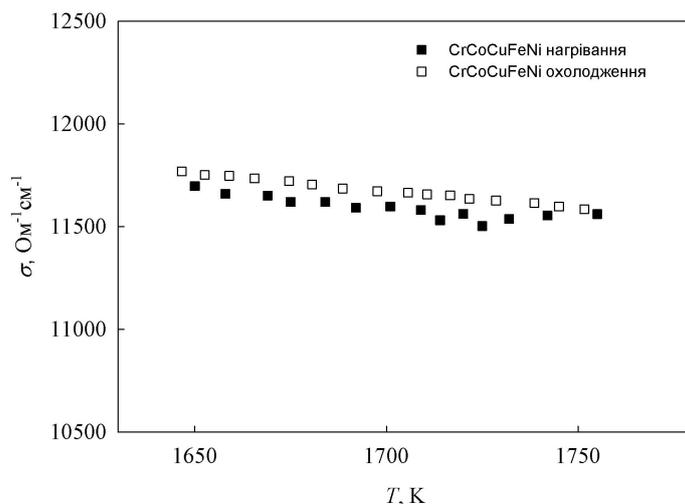


Рис. 5. Залежність електропровідності від температури розплаву  $\text{Co}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Cu}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{20}$   
 Fig. 5. Electrical conductivity vs. temperature for  $\text{Co}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Cu}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{20}$  liquid alloy

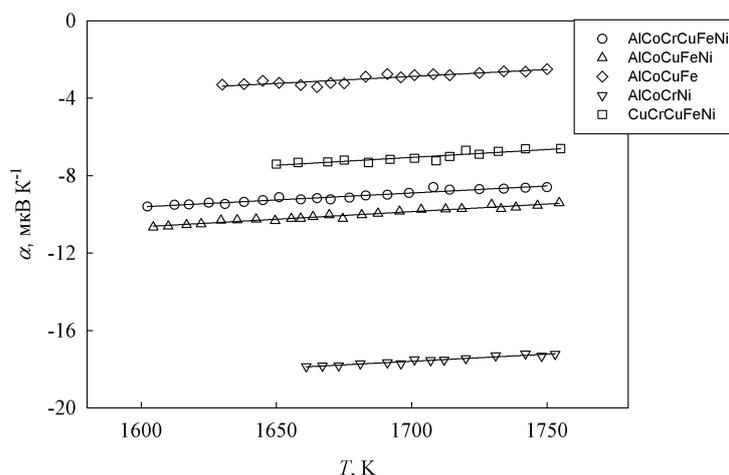


Рис. 6. Залежність термоЕРС від температури розплавів  $\text{Al}_{16.6}\text{Co}_{16.6}\text{Cr}_{16.6}\text{Cu}_{16.6}\text{Fe}_{16.6}\text{Ni}_{16.6}$ ,  $\text{Al}_{20}\text{Co}_{20}\text{Cu}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{20}$ ,  $\text{Al}_{25}\text{Co}_{25}\text{Cu}_{25}\text{Fe}_{25}$ ,  $\text{Al}_{25}\text{Co}_{25}\text{Cr}_{25}\text{Ni}_{25}$ ,  $\text{Co}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Cu}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{20}$  під час охолодження. Суцільними лініями позначено апроксимаційні криві полінома (2)

Fig. 6. Thermoelectric power vs. temperature for  $\text{Al}_{16.6}\text{Co}_{16.6}\text{Cr}_{16.6}\text{Cu}_{16.6}\text{Fe}_{16.6}\text{Ni}_{16.6}$ ,  $\text{Al}_{20}\text{Co}_{20}\text{Cu}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{20}$ ,  $\text{Al}_{25}\text{Co}_{25}\text{Cu}_{25}\text{Fe}_{25}$ ,  $\text{Al}_{25}\text{Co}_{25}\text{Cr}_{25}\text{Ni}_{25}$ ,  $\text{Co}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Cu}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{20}$  liquid alloys during cooling. Solid lines indicate the approximation curves of the polynomial (2)

На сьогодні поведінка електропровідності високоентропійних сплавів за високих температур практично не вивчена, тоді як за низьких температур, не зважаючи на складні ефекти, пов'язані з магнітними фазовими переходами, а можливо, і завдяки їм, електропровідність досліджена ліпше. За високих температур основні проблеми пов'язані з величиною внеску спінового розупорядкування і порівняно невеликими значеннями електропровідності. У межах  $s-d$  моделі Мотта таку поведінку електропровідності можна пояснити, якщо електронна густина станів має виражену структуру поблизу рівня Фермі, так що внески в електропровідність, зумовлені розмиттям функції Фермі, відіграють суттєву роль [15]. Загалом для

рідких металів ця проблема добре описується в межах теорії Займана. Однак застосування її до перехідних металів спричиняє певні труднощі, що насамперед зумовлено сильним розсіюванням таких матеріалів. Відповідно, можна стверджувати, що основний внесок в електропровідність робить резонансне розсіювання на  $d$ -електронах. У сплавах перехідних металів між собою, або з  $\text{Cu}$  чи  $\text{Al}$  концентрація електронів провідності становить близько одного електрона на атом, і як наслідок  $2k_f$  завжди менше, ніж  $k_p$  (положення першого піка структурного фактора). Тому температурний коефіцієнт електропровідності є від'ємним, що точно відповідає спостережуваній картині.

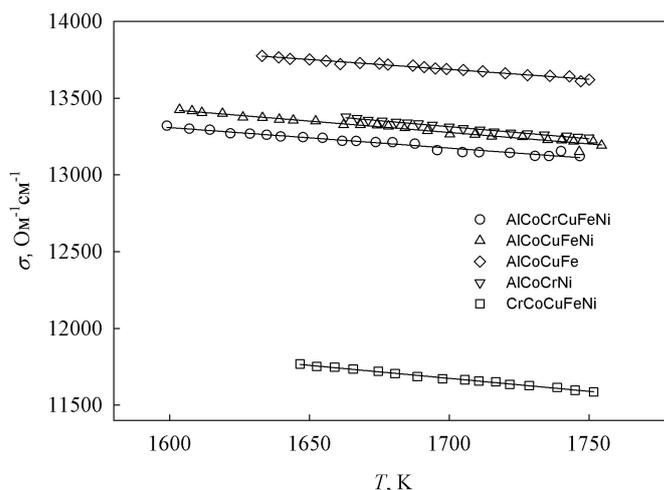


Рис. 7. Залежність електропровідності від температури розплавів  $Al_{16.6}Co_{16.6}Cr_{16.6}Cu_{16.6}Fe_{16.6}Ni_{16.6}$ ,  $Al_{20}Co_{20}Cu_{20}Fe_{20}Ni_{20}$ ,  $Al_{25}Co_{25}Cu_{25}Fe_{25}$ ,  $Al_{25}Co_{25}Cr_{25}Ni_{25}$ ,  $Co_{20}Cr_{20}Cu_{20}Fe_{20}Ni_{20}$  під час охолодження. Суцільними лініями позначено апроксимаційні криві полінома (1)

Fig. 7. Electrical conductivity vs. temperature for  $Al_{16.6}Co_{16.6}Cr_{16.6}Cu_{16.6}Fe_{16.6}Ni_{16.6}$ ,  $Al_{20}Co_{20}Cu_{20}Fe_{20}Ni_{20}$ ,  $Al_{25}Co_{25}Cu_{25}Fe_{25}$ ,  $Al_{25}Co_{25}Cr_{25}Ni_{25}$ ,  $Co_{20}Cr_{20}Cu_{20}Fe_{20}Ni_{20}$  liquid alloys during cooling. Solid lines indicate the approximation curves of the polynomial (1)

Відомо, що розв’язок кінетичного рівняння Больцмана для електронів у металі встановлює зв’язок між термоЕРС й електропровідністю:

$$\alpha = \frac{\pi^2 k_B^2 T}{3e} \left[ \frac{\partial \ln \sigma(E)}{\partial E} \right]_{E=E_F} \quad (3)$$

Вираз у дужках означає, що необхідно знайти залежність електропровідності від енергії, а потім похідну за енергією за реальної енергії Фермі  $E_F$ . З формули (3) випливає, що термоЕРС має власний знак. Справді, можна записати:

$$\frac{\partial \ln \sigma(E)}{\partial E} = \frac{\partial \ln \lambda(E)}{\partial E} + \frac{\partial \ln S_F}{\partial E} \quad (4)$$

Тобто залежність термоЕРС від енергії визначається як довжиною вільного пробігу електронів  $\lambda$ , так і площею поверхні Фермі  $S_F$ . Причому, якщо перший доданок завжди додатний, то другий може бути й від’ємним, залежно від форми поверхні Фермі, що спостерігається в досліджених сплавах на прикладі абсолютних значень термоЕРС.

У перехідних металах ситуація ще складніша. У межах зонної  $s-d$  моделі Мотта термоЕРС пропорцій-

на першій похідній від густини електронних станів за енергією. Якщо оцінювати значення термоЕРС за залежностями густини станів, то значення можуть бути суттєво більшими, ніж ті, що отримуємо експериментально. Такі оцінки вказують на те, що лише невелика частина носіїв заряду розсіюється за зонним типом зі зміною ефективної маси  $s$ -носіїв у зв’язку з їх переходом в  $d$ -зону. Тому, очевидно, домінують інші види розсіювання.

#### IV. ВИСНОВКИ

Експериментально досліджено електропровідність та термоЕРС, а також проаналізовано поведінку та температурні залежності цих характеристик у розплавах еквіатомних концентрацій  $Al_{16.6}Co_{16.6}Cr_{16.6}Cu_{16.6}Fe_{16.6}Ni_{16.6}$ ,  $Al_{20}Co_{20}Cu_{20}Fe_{20}Ni_{20}$ ,  $Al_{25}Co_{25}Cu_{25}Fe_{25}$ ,  $Al_{25}Co_{25}Cr_{25}Ni_{25}$ ,  $Co_{20}Cr_{20}Cu_{20}Fe_{20}Ni_{20}$  у широкому інтервалі від температур плавлення до 1750 К. Показано, що механізм розсіювання заряду у високоентропійних сплавах системи AlCoCrCuFeNi описується  $s-d$ -зонною моделлю Мотта.

Дослідження проведено за підтримки Міністерства освіти і науки України (номер державної реєстрації НДР: 0119U002204).

[1] M. C. Gao, J.-W. Yeh, P. K. Liaw, Y. Zhang, *High-Entropy Alloys. Fundamentals and Applications* (Springer International Publishing Switzerland,

2016); <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-27013-5>.

[2] J. W. Yeh *et al.*, *Adv Eng Mater* **6**, 299 (2004); <https://doi.org/10.1007/s11665-004-0022-0>.

- //doi.org/10.1002/adem.200300567.
- [3] Y. F. Ye, Q. Wang, J. Lu, C.T. Liu, Y. Yang, *Mater. Today* **19**, 349 (2016); <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2015.11.026>.
- [4] S. Mudry, Yu. Plevachuk, V. Sklyarchuk, A. Yaky-movych, *J. Non-Cryst. Sol.* **354**, 4415 (2008); <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2008.06.061>.
- [5] O. A. Chikova, V. S. Tsepelev, V. V. V'yukhin, *Russ. J. Non-Ferr. Met.* **56**, 246 (2015); <https://doi.org/10.3103/S1067821215030037>.
- [6] O. A. Chikova, V. Yu. Il'in, V. S. Tsepelev, V. V. V'yukhin, *Inorg. Mater.* **52**, 564 (2016); <https://doi.org/10.1134/S0020168516050022>.
- [7] M. Dufanets, V. Sklyarchuk, Yu. Plevachuk, *Ukr. J. Phys.* **65**, 1089 (2020); <https://doi.org/10.15407/ujpe65.12.1089>.
- [8] C. J. Tong *et al.*, *Metall. Mater. Trans. A* **36**, 1263 (2005); <https://doi.org/10.1007/s11661-005-0218-9>.
- [9] C. J. Tong *et al.*, *Metall. Mater. Trans. A* **36**, 881 (2005); <https://doi.org/10.1007/s11661-005-0283-0>.
- [10] A. Li, X. Zhang, *Acta Metall Sin-Engl.* **22**, 219 (2009).
- [11] M-H. Tsai, J-W. Yeh, *Mater. Res. Let.* **2**, 107 (2014); <https://doi.org/10.1080/21663831.2014.912690>.
- [12] M. Dufanets, V. Sklyarchuk, Yu. Plevachuk, Y. Kulyk, S. Mudry, *J. Mater. Eng. Perform.* **29** 7321 (2020); <https://doi.org/10.1007/s11665-020-05250-6>.
- [13] A. Dobosz, Yu. Plevachuk, V. Sklyarchuk, B. Sokoliuk, T. Gancarz, *Fluid Phase Equilib.* **465**, 1 (2018); <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2018.03.001>.
- [14] Y. Plevachuk, V. Sklyarchuk, *Meas. Sci. Technol.* **12**, 23, (2001); <https://doi.org/10.1088/0957-0233/12/1/303>.
- [15] N. Mott, E. Davis, *Electron Processes in Non-Crystalline Materials* (Clarendon Press, Oxford, 1979); <https://www.lehmans.de/shop/naturwissenschaften/28314387-9780191023286-electronic-processes-in-non-crystalline-materials>.

## ELECTRICAL CONDUCTIVITY AND THERMOPOWER OF HIGH-ENTROPY $\text{AlCoCrCuFeNi}$ LIQUID ALLOYS

M. Dufanets, Yu. Plevachuk, V. Sklyarchuk  
*Ivan Franko National University of Lviv*  
 8, Kyrylo & Mefodiy St., Lviv, UA-79005 Ukraine

Conventional alloys are mainly based on one principal element with different kinds of alloying elements added to improve their properties. These alloys form an alloy family based on the chosen principal element. However, the number of elements in the periodic table is limited, thus the alloy families which can be developed are also limited. The new concept has been named a high-entropy alloy (HEAs). According to the proposed definition, any multi-component alloy consisting of five or more principal elements which have a concentration between 5 and 35 at.%, belongs to HEA. Besides principal elements, HEAs could contain also minor elements with concentrations below 5 at.%. Compared to conventional alloys, these alloys have significantly higher mixing entropies, which lead to the formation of liquid or random solid solution states. Thus, the effect of entropy is much more pronounced in high-entropy alloys than in conventional alloys. The high entropy of mixing in these alloys facilitates the formation of solid solution phases with simple structures. Thus, it reduces the number of phases formed in HEAs during solidification process. Such unique structural features caused by the effect of higher entropy are of paramount importance for further industrial application of these alloys.

Due to the unique multi-principal element composition, the high-entropy alloys can have extraordinary properties, including high strength/hardness, outstanding wear resistance, exceptional high-temperature strength, good structural stability, good corrosion and oxidation resistance. Some of these properties are not seen in conventional alloys, making HEAs attractive in many fields. The fact that they can be used at high temperatures broadens their spectrum of applications even further. Moreover, the fabrication of HEAs does not require special processing techniques or equipment, which indicates that the mass production of HEAs can be easily implemented with existing equipment and technologies. The development of new advanced materials with predicted properties requires a clear and thorough understanding of their structural properties on the basis of sufficient and reliable thermophysical data. The increasing influence of computational modeling in all technological processes generates an increased demand for accurate values of the physical properties of the materials involved, which are used as fundamental inputs for each model. The solidification process of a liquid alloy has a profound impact on the structure and properties of the solid material. Therefore, knowledge of the thermophysical properties of molten alloys becomes very important for understanding the structural transformations in alloys in the liquid-solid temperature range and modeling the solidification process, so that materials with required characteristics can be developed.

In this study, experimental measurements of electrical conductivity and thermoelectric power of the liquid HEAs of equiatomic concentrations  $\text{Al}_{16.6}\text{Co}_{16.6}\text{Cr}_{16.6}\text{Cu}_{16.6}\text{Fe}_{16.6}\text{Ni}_{16.6}$ ,  $\text{Al}_{20}\text{Co}_{20}\text{Cu}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{20}$ ,  $\text{Al}_{25}\text{Co}_{25}\text{Cu}_{25}\text{Fe}_{25}$ ,  $\text{Al}_{25}\text{Co}_{25}\text{Cr}_{25}\text{Ni}_{25}$  and  $\text{Co}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Cu}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{20}$  were carried out in a wide temperature range from their melting points to 1750 K.

**Key words:** high-entropy alloys, electrical conductivity, thermoelectric power.