

В.М. СКЛЯРЧУК,¹ Ю.О. ПЛЕВАЧУК,¹ А.О. ОМЕЛЬЧУК,² Н.В. ФАЙДЮК²¹ Львівський національний університет ім. Івана Франка

(Вул. Кирила і Мефодія 8, Львів 79005; e-mail: plevachuk@mail.lviv.ua)

² Інститут загальної та неорганічної хімії ім. В.І. Вернадського

(Просп. Академіка Палладіна, 32/34, Київ 03680)

В'ЯЗКІСТЬ, ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ, ТЕРМО-ЕРС ІОННИХ ТА ІОННО-ЕЛЕКТРОННИХ РІДИННИХ СИСТЕМ ЕВТЕКТИЧНОГО СКЛАДУ

УДК 539.1, 621.039.5,
537.57

Досліджено та порівняно температурні залежності в'язкості, електропровідності та термо-ерс іонних та іонно-електронних рідинних систем евтектичного складу в широкому температурному інтервалі, що включає температури плавлення цих сплавів.

Ключові слова: іонні рідинні системи, іонно-електронні рідинні системи, евтектика, в'язкість, електропровідність, термо-ерс.

1. Вступ

Рідкі метали та напівпровідники, які свого часу почали широко застосовувати в енергетиці, згідно з класифікацією [1,2], названо іонно-електронними рідинами на підставі того, що їхні основні властивості визначаються саме поведінкою іонних та електронних підсистем. Такі рідини належать до невпорядкованих середовищ, що набувають дедалі ширшого застосування в техніці та в сучасних технологіях, наприклад, у розробці атомних реакторів четвертого покоління. Сучасна ядерна енергетика нового покоління, яка покликана усунути поширення технології отримання збройових ізотопів, а також радіоактивного забруднення навколишнього середовища, передбачає розробку шести типів реакторів четвертого покоління, чинне місце серед яких займають реактори-трансмутатори, що створюються для глибокого випалювання збройових ізотопів та знищення радіоактивних відходів шляхом керованої прискорювачем трансмутації довгоживучих радіонуклідів [3]. Придатним середовищем для реалізації такої трансмутації є розплавлені сольові паливні суміші, які і дали назву одному з типів реакторів четвертого покоління – рідинно-сольові реактори [4]. При цьому за носії ядерного палива рекомендують вибирати суміші фторидів металів, що мають незначні повні перерізи захоплення теплових нейтронів. Метою даної роботи є порівняння фізичних властивостей,

а саме в'язкості, електропровідності, термо-ерс іонних (сольові розплави) та іонно-електронних (металеві розплави) рідинних систем евтектичного складу, як можливих теплоносіїв енергетичних установок.

2. Експериментальна частина

Вимірювання в'язкості проводили на керованому комп'ютером віскозиметрі з поворотним тиглем [5]. Вимірювальні комірки виготовляли з графіту у формі циліндричного контейнера з внутрішнім діаметром 14 мм і висотою 30 мм. Період і логарифмічний декремент затухання коливань визначались за допомогою оптичної системи. В'язкість розраховувалася за модифікованим рівнянням Роско для зразків циліндричної форми з відкритою поверхнею. Вимірювання проводилися в атмосфері 90%Ag + 10%H₂. У камері підтримувалося гомогенне температурне поле 0,5 К в діапазоні до 800 К. Температура вимірювалася за допомогою WRe-5/20 термомпари, розташованої під контейнером. Похибка вимірювань в'язкості не перевищувала 3%.

Вимірювання електропровідності та термо-ерс проводили під тиском аргону (до 10 МПа) контактним методом за 4-точковою схемою. Використовували вимірювальні комірки з пресованого нітриду бору у формі вертикальних контейнерів з висотою 60 мм та діаметром 3 мм. Конструкція комірки дає можливість одночасного виміру електроопору та термо-ерс. Високотемпературний нагрівач з трьома незалежно регульованими нагрівни-

© В.М. СКЛЯРЧУК, Ю.О. ПЛЕВАЧУК,
А.О. ОМЕЛЬЧУК, Н.В. ФАЙДЮК, 2015

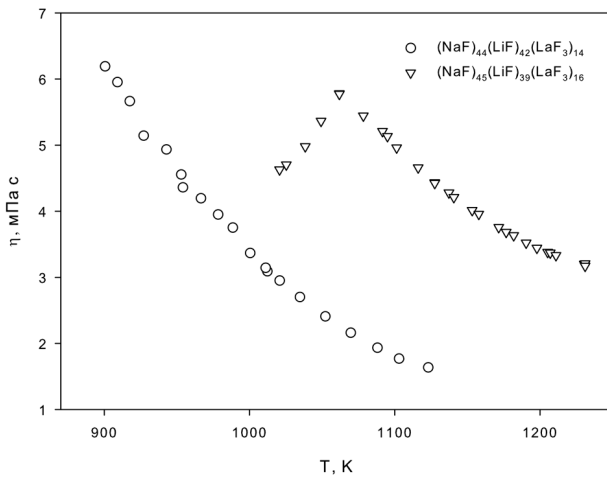


Рис. 1. Температурна залежність в'язкості розплавів NaF–LiF–LaF₃ [7]

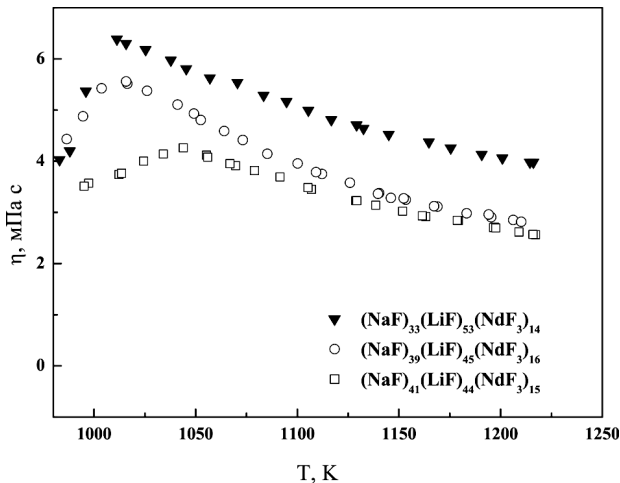


Рис. 2. Температурна залежність в'язкості розплавів NaF–LiF–NdF₃ [8]

ми елементами дозволяв підтримувати рівномірне температурне поле в межах 0,2–0,3 К у робочому інтервалі температур при вимірах електроопору, або створювати градієнт температури до 15–20 К вздовж комірки при вимірах термо-ерс. Наважені з точністю до 10^{-4} г компоненти синтезували у відкачаних і запаяних кварцевих ампулах при залишковому тиску 10–15 Па, а потім заправляли безпосередньо у комірку. Експериментальна установка і процедура вимірювань описані в [6]. Похибка визначення електропровідності, $\sigma(T)$, не перевищувала 2%, а термо-ерс, $S(T)$ – 5%.

3. Результати експерименту та їх обговорення

На рис. 1, 2 наведено дані температурної залежності в'язкості іонних рідких систем. Як видно з рис. 1, для зразка E(La) евтектичного складу системи NaF–LiF–LaF₃ в усьому дослідженому інтервалі температур в'язкість зменшується за зростання температури. Обробка отриманих експериментальних даних за допомогою закону Арреніуса:

$$\eta(T) = \eta_0 \exp\left(\frac{Q}{RT}\right), \quad (1)$$

де η_0 – константа, Q – енергія активації в'язкої течії, дала такі значення: в інтервалі температур 900–970 К $Q = 55 \pm 3$ кДж/моль і в інтервалі температур 970–1150 К $Q = 36 \pm 3$ кДж/моль.

На рис. 2 наведено також температурну залежність в'язкості іонної рідкої системи NaF–LiF–LaF₃ перитектичного складу P(La). Як бачимо, у разі зменшення температури від максимальної в'язкості зразка P(La) зростає і досягає максимального значення за температури $T = 1080 \pm 5$ К. У разі зменшення температури нижче 1080 К значення в'язкості зменшується. Таку саму поведінку має температурна залежність в'язкості зразків E(Nd), P₁(Nd), P₂(Nd) системи NaF–LiF–NdF₃. Для зразка евтектичного складу E(Nd) максимальне значення в'язкості (див. рис. 2) було отримано за температури 1005 ± 5 К, а для P₁(Nd) і P₂(Nd), відповідно, 1010 ± 5 К і 1045 ± 5 К. Необхідно зауважити, що різниця між знайденими температурними максимумами в'язкості і температурами плавлення відповідних зразків у межах похибки збігаються. Існування таких особливих точок, які знаходяться вище температур плавлення зразків на 150–160 К, можна пояснити тим, що в дослідженому інтервалі температур розплави NaF–LiF–LaF₃ і NaF–LiF–NdF₃ знаходяться у нерівноважному стані, зумовленому інконгруентним плавленням сполук NaLaF₄, NaNdF₄ і Na₅Nd₉F₃₂. Неоднорідність рідкої системи і приводить до того, що формули Швидковського [9], які використовуються для розрахунку в'язкості, вже не можна застосовувати. Таким чином, для P(La) нижче від 1080 ± 5 К, для E(Nd) нижче від 1005 ± 5 К, для P₁(Nd) нижче від 1010 ± 5 К і для P₂(Nd) нижче від 1045 ± 5 К метод Швидковського не дозволяє визначити значення в'язкості. Разом з тим, слід за-

уважити, що такі вимірювання дозволяють визначити максимальні температури, за яких ще інконгруентно не розплавилась сполука NaLaF_4 в системі NaF-LiF-LaF_3 і сполуки NaNdF_4 , $\text{Na}_5\text{Nd}_9\text{F}_{32}$ в системі NaF-LiF-NdF_3 . Аналіз рис. 1, 2 показує, що зміна складу розплаву суттєво впливає на зміну в'язкості іонної рідкої системи. Так, перехід від евтектики до перитектики в системі з La, в температурному інтервалі 1050 ± 1250 K, збільшує в'язкість рідкої системи NaF-LiF-LaF_3 вдвічі, а перехід від евтектики до перитектики зменшує в'язкість розплаву NaF-LiF-NdF_3 в 1,5 раза.

На рис. 3, 4 наведено результати вимірювань температурних залежностей термо-ерс розплавів NaF-LiF-LaF_3 і NaF-LiF-NdF_3 . Як видно на рис. 3, діапазон зміни термо-ерс в системі NaF-LiF-LaF_3 для перитектики вдвічі менше, ніж для евтектики. Для системи NaF-LiF-NdF_3 діапазон зміни S з евтектичним і перитектичним складами практично збігаються. Звертає увагу той факт, що якщо для систем з La вимірювана залежність $S(T)$ у разі зростання температури іде від негативних значень в точці плавлення, то для системи з Nd $S(T)$ у точці плавлення має додатний знак. У разі зростання температури як в одній, так і в другій системах $S(T)$ зростає, причому, якщо для зразків з лантаном $S(T)$ досягає позитивних значень, то для зразків з неодимом $S(T)$ залишається негативною. Як видно на рис. 2, а, на залежності $S(T)$ для E(La) і P(La) є мінімуми, відповідно за температур 950 ± 5 K і 1040 ± 5 K. На залежності $S(T)$ для зразків з неодимом також існують мінімуми (див. рис. 2, б) за температур 970 ± 5 K для E(Nd), 990 ± 5 K для P₁(Nd) і 1040 ± 5 K для P₂(Nd), при яких похідна змінює знак.

Порівнюючи рис. 3 з рис. 4, можна відзначити, що якщо для системи NaF-LiF-NdF_3 температурну залежність $S(T)$ приблизно можна описати за допомогою двох похідних ($\frac{dS}{dT}$) протилежного знака, то для опису $S(T)$ в системі NaF-LiF-LaF_3 такий опис потребує вже трьох похідних ($\frac{dS}{dT}$). Однією з причин такої поведінки температурної залежності термо-ерс і відносно великих її абсолютних значень ($\sim 1000 \mu\text{V/K}$) у порівнянні з рідкими металами ($\sim 10 \mu\text{V/K}$) і рідкими напівпровідниками ($\sim 100 \mu\text{V/K}$) є перенос тепла іонами, що дає суттєвий внесок в $S(T)$, який ймовірно чутливі до структури сольових розплавів [10, 11]. Зауважимо, що досліджені зразки обох систем в рідкому

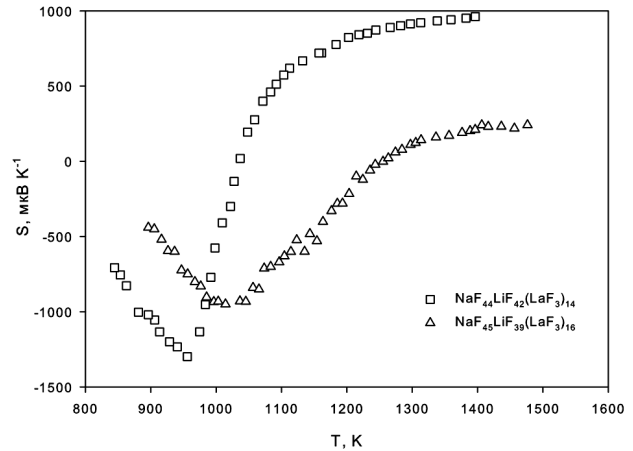


Рис. 3. Температурна залежність термо-ерс розплавів NaF-LiF-LaF_3 [7]

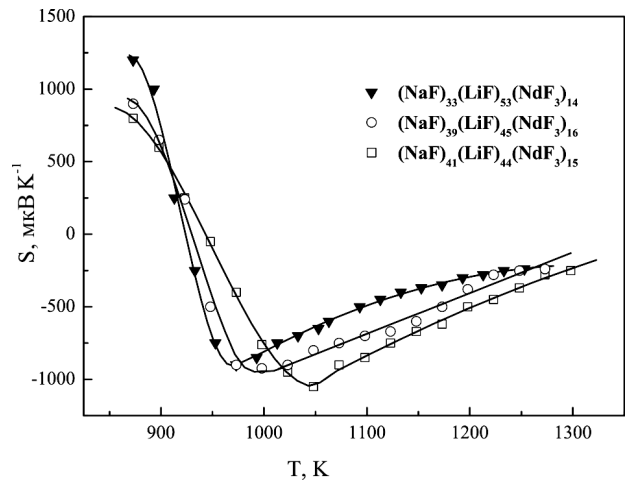


Рис. 4. Температурна залежність термо-ерс розплавів NaF-LiF-NdF_3 [8]

стані складаються з іонів протилежного знака і невеликої частки недосиційованих молекул, тому структура розплавів залежить як від початкового складу компонент, їх взаємодій, так і від температури. Поведінку термо-ерс у таких іонних рідких системах можна проаналізувати за допомогою рівняння

$$S(T) = \frac{1}{T} \left(\sum \frac{Q_i^+}{e_0 z_i} t_i^+ - \sum \frac{Q_i^-}{e_0 z_i} t_i^- - \frac{Q_e}{e_0} t_e \right) - A, \quad (2)$$

де e_0 – заряд електрона, Q_i^+ – теплота переносу i -го позитивного іона, Q_i^- – теплота переносу i -го

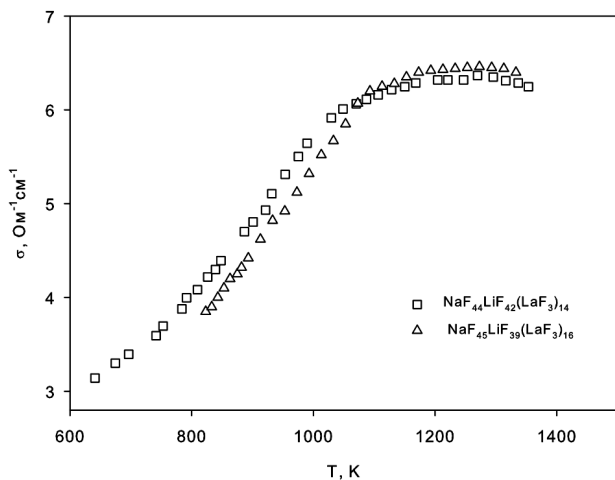


Рис. 5. Температурна залежність електропровідності розплавів NaF–LiF–LaF₃ [7]

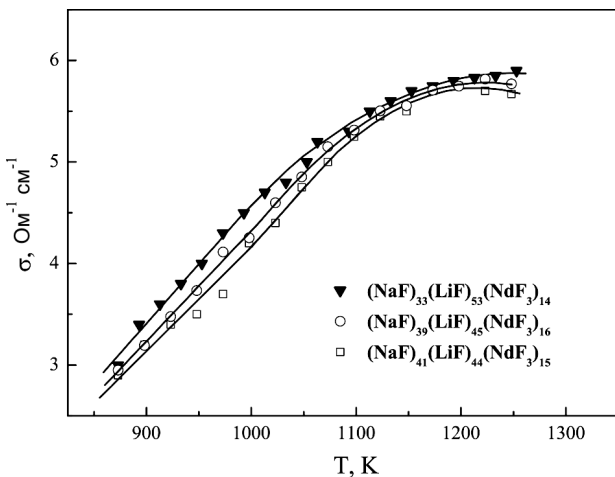


Рис. 6. Температурна залежність електропровідності розплавів NaF–LiF–NdF₃ [8]

негативного іона, Q_e – теплота переносу електрона, t_i^+ – парціальний внесок у перенесений заряд i -го позитивного іона, t_i^- – парціальний внесок у перенесений заряд i -го негативного іона, t_e – парціальний внесок електронів у перенесений заряд, A – константа для даної іонної рідинної системи. Зміна знака похідної ($\frac{dS}{dT}$) пов'язана зі зміною домінуючого внеску в термо-ерс іонів одного або іншого знаків.

З формули (2) можна отримати значення температури, за якої $S(T)=0$:

$$T_{S=0} = \frac{1}{A} \left(\sum \frac{Q_i^+}{e_0 z_i} t_i^+ - \sum \frac{Q_i^-}{e_0 z_i} t_i^- - \frac{Q_e}{e_0} t_e \right). \quad (3)$$

Величина вказаної температури визначається теплотами переносу іонів і електронів, а також парціальними внесками цих частинок у сумарний перенесений заряд. Як видно з (3), існує тільки одна температура, за якої крива $S(T)$ перетинає пряму $S = 0$, що і підтверджує експеримент.

Слід зауважити, що на температурній залежності $S(T)$ для зразків з лантаном крім точки мінімуму існує ще одна особлива точка, в якій похідна ($\frac{dS}{dT}$) різко змінює своє значення. Ці точки відповідають температурі $T = 1100 \pm 10$ К для зразків евтектичного складу і температурі $T = 1300 \pm 10$ К для зразків перитектичного складу. Різка зміна величини похідної $\frac{dS}{dT}$ за вказаних вище температур, на нашу думку, пов'язана з наявністю третього доданка у формулі (3), що характерно для досліджених систем з лантаном, і відсутнє в досліджених системах з неодимом. Звертає на себе увагу той факт, що ці точки на кривих $S(T)$, свідчать про якісні зміни в структурі розплаву NaF–LiF–LaF₃, які корелюють із зникненням передпіка на структурному факторі.

На рис. 5, 6 наведено температурну залежність електропровідності розплавів NaF–LiF–LaF₃ та NaF–LiF–NdF₃, виміряної на постійному струмі.

У цілому, досліджені розплави як з лантаном, так і з неодимом евтектичної і перитектичної концентрацій поведуть себе як напівпровідники: за зростання температури електропровідність зростає за законом

$$\sigma = \sigma_0 \exp[-\Delta E/2kT], \quad (4)$$

де ΔE – енергія активації електропровідності.

Детальніший аналіз рис. 5 показує, що у випадку системи з лантаном така напівпровідникова залежність електропровідності від температури існує для зразка E(La) до температури 1100 К, а для зразка P(La) – до температури 1300 К. За вищих температур спостерігається зменшення електропровідності, яке є характерним для рідких металів. Знайдені з рівняння (5) ΔE для E(La) дорівнює $0,29 \pm 0,01$ еВ, а для P(La) $\Delta E = 0,31 \pm 0,01$ еВ. На рис. 6 наведено температурні залежності $\sigma(T)$ для зразків E(Nd), P₁(Nd) і P₂(Nd). На відміну від зразків з лантаном, у даному випадку не спостерігається перехід від напівпровідникової до металевий провідності і знайдені величини ΔE мають значення: $\Delta E = 0,42 \pm 0,01$ еВ для E(Nd), $\Delta E =$

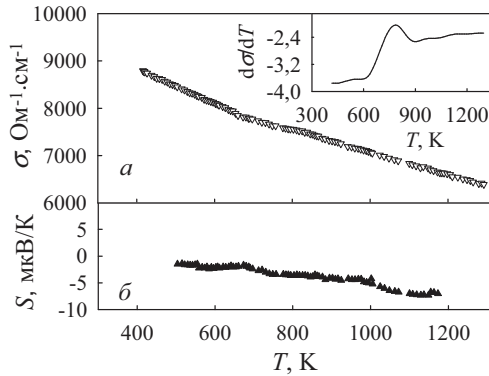


Рис. 7. Залежність $\sigma(T)$, похідної електропровідності від температури (а) і $S(T)$ (б) евтектичного розплаву $Pb_{44}Bi_{56}$ [15]

$= 0,44 \pm 0,01$ eV для $P_1(Nd)$ і $\Delta E = 0,32 \pm 0,01$ eV для $P_2(Nd)$.

Дослідження розплавів бінарних та потрійних металевих систем, що містять евтектику, також виявили неоднозначну та суперечливу поведінку фізичних властивостей. Результати та їхня інтерпретація базувалися на моделі статистичного розподілу атомів у розплавах, або квазіевтектичній моделі. Евтектичні розплави можуть розглядатися як чергування мікрообластей з нечітко вираженими краями, атомна концентрація яких близька до концентрації в твердих розчинах, що формують евтектику. При цьому відбувається неперервний масообмін між мікрообластями. Прямі структурні дослідження не дають однозначної відповіді на питання про мікронеоднорідну будову евтектичних розплавів. Кількісна оцінка результатів свідчить про те, що в розплавах можливий як квазіевтектичний чи статистичний, так і проміжний розподіл атомів.

Проведені вимірювання $\sigma(T)$, $S(T)$, $\eta(T)$ евтектичних систем не виявили різких змін на кривих досліджених властивостей, однак виявлені немонотонності (рис. 7–12) свідчать про те, що розплави зазнають численних структурних перетворень від початкового неоднорідного рідкого стану безпосередньо після плавлення до повного розчину, що поступово формується під час подальшого нагрівання [12–16]. При такій структурній реорганізації руйнуються попередні й утворюються нові зв'язки, а сама квазіевтектична структура може розглядатися як мікроемульсія або мікросупензія диспергованих нано- і мікрочастинок, збага-

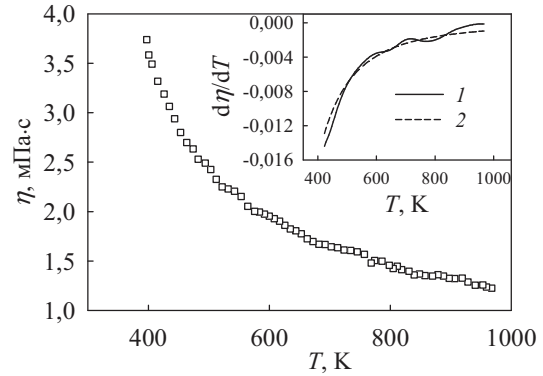


Рис. 8. Залежність $\eta(T)$ та похідної в'язкості від температури евтектичного розплаву $Pb_{44}Bi_{56}$: 1 – експер., 2 – теор. [15]

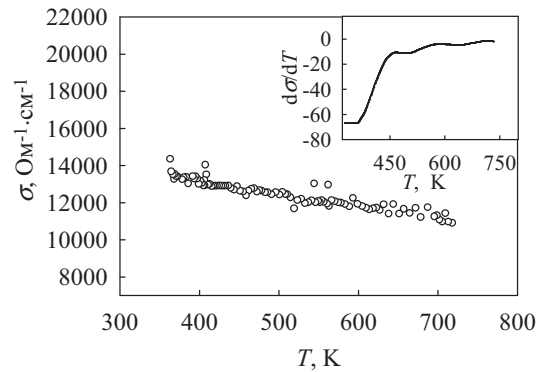


Рис. 9. Залежність $\sigma(T)$ та похідної електропровідності від температури евтектичного розплаву $Bi_{43}Sn_{57}$ [15]

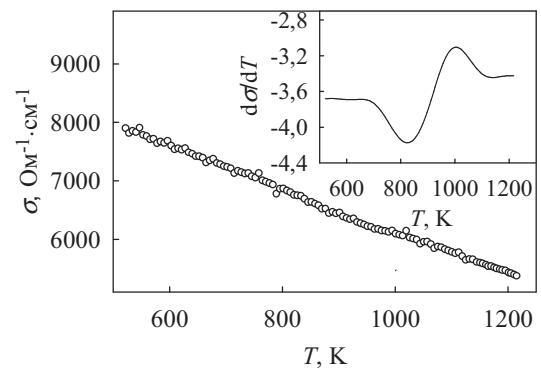


Рис. 10. Залежність $\sigma(T)$ та похідної електропровідності від температури евтектичного розплаву $Pb_{83}Mg_{17}$ [15]

чених одним з компонентів і оточених розплавленою матрицею іншого. Внаслідок різниці густин компонентів відбувається осаджування угруповань, однак повне осаджування нівелюється ін-

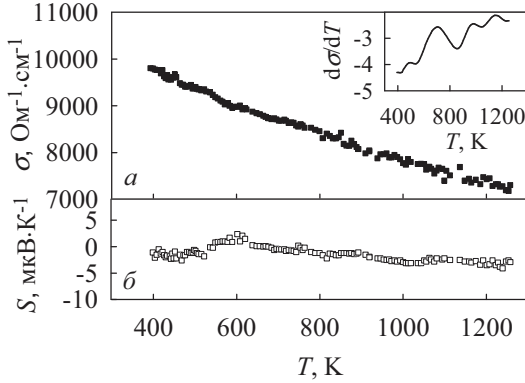


Рис. 11. Залежність $\sigma(T)$, похідної електропровідності від температури (а) та $S(T)$ (б) евтектичного розплаву $\text{Bi}_{46}\text{Pb}_{29}\text{Sn}_{25}$ [15]

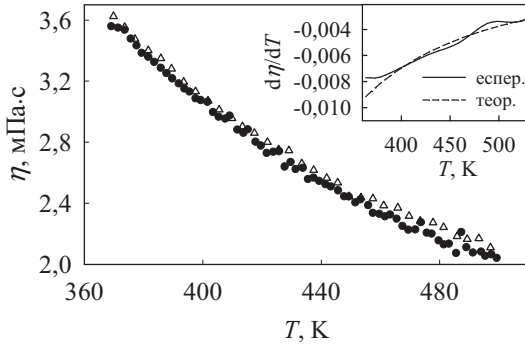


Рис. 12. Залежність $\eta(T)$ і похідної в'язкості від температури розплавів $\text{Bi}_{46}\text{Pb}_{29}\text{Sn}_{25}$: Δ – 1-й зразок, \bullet – 2-й зразок [15]

тенсивним броунівським рухом, що спричинює неомогенний розподіл частинок за висотою.

Залежність фізичних властивостей від характеру впорядкованості компонентів пояснюють, керуючись правилом Матісена, питомий електричний опір розплаву при статистичному розподілі домішкових атомів:

$$\rho_{st} = \rho_0 + \Delta\rho, \quad (5)$$

де ρ_0 – опір матриці; $\Delta\rho$ – додатковий опір, який формується за рахунок домішок. Домішки змінюють енергетичний спектр і довжину вільного пробігу носіїв заряду, і рівняння (5) можна переписати у вигляді [16]:

$$\rho_{st} = \frac{12\pi^3 \hbar}{S_F^{st} e^2 l_{st}}, \quad (6)$$

де S_F^{st} – площа поверхні Фермі вільних електронів, що дорівнює $4\pi k^2$, $k = 2\pi(3N/4\pi)^{1/3}$, N – кіль-

кість атомів в одиниці об'єму, l_{st} – довжина вільного пробігу електрона.

Формування мікрогруповань атомів одного сорту є флуктуючим за характером і не може супроводжуватися значними змінами енергетичного спектра електронів порівняно з подібними процесами в статистичному розплаві. Однак, характер розсіювання носіїв заряду має змінитися через зміну їхньої рухливості. Якщо κ , згідно зі статистичним розподілом, є часткою розсіювальних центрів, а $(1 - \kappa)$ – частка атомів у мікрогрупованнях, то електроопір розплаву з подібним змішаним розподілом:

$$\sigma = \frac{S_F e^2}{12\pi^3 \hbar} [\kappa l_{st} + (1 - \kappa) l_{eut}], \quad (7)$$

де l_{eut} – довжина вільного пробігу електронів у мікрогрупованнях.

Термо-ерс за високих температур головно визначається її дифузійною складовою і для будь-якого металевого розплаву має вираз

$$S = \frac{\pi^2 k^2 T}{3e} \left(\frac{d(\ln \sigma)}{dE} \right)_{E=E_F}. \quad (8)$$

У припущенні, що хвильовий вектор на рівні Фермі не залежить від ближнього порядку, сумарна термо-ерс:

$$S = t \frac{\sigma^{st}}{\sigma} S^{st} + (1 - t) \frac{\sigma^{eut}}{\sigma} S^{eut}, \quad (9)$$

де

$$S^{st} = \frac{\pi^2 k^2 T}{3e} \left(\frac{d(\ln \sigma^{st})}{dE} \right)_{E=E_F} \quad (10)$$

– термо-ерс статистично впорядкованого розплаву,

$$S^{eut} = \frac{\pi^2 k^2 T}{3e} \left(\frac{d(\ln \sigma^{eut})}{dE} \right)_{E=E_F} \quad (11)$$

– термо-ерс евтектичного впорядкування і виражаються рівнянням (9). Такі два типи ближнього порядку визначають поведінку фізичних властивостей розчину.

Відхилення концентраційної залежності властивостей від лінійності під час наближення до евтектичного складу є наслідком утворення мікронеоднорідної будови, що зумовлено наявністю ділянок з різною термодинамічною стабільністю, які,

як і в монотектиках, розділені лініями спінодалі і бінодалі. Однак поділу фаз у явно вираженій формі тут немає. Ці ділянки є аномальними флуктуаціями концентрації, що впливають на зміну загально передбачуваних фізичних властивостей. Таке явище можна розглядати як певний тип мікросегрегації. Після плавлення зразка зберігається квазіевтектична структура гетерогенного розплаву і за висотою зразка формується градієнт концентрації. Припускається, що в температурному інтервалі, де наявна лінійна залежність $\sigma(T)$ (нахил $d\sigma/dT$ є майже постійним), відбуваються зворотні зміни як складу розплаву, так і розмірів частинок. Частинки перебувають у метастабільній рівновазі з матрицею. Після досягнення характерної для кожного складу температури, відображеної як перегин на кривій $\sigma(T)$ або як різке зростання $d\sigma/dT$, починається розчинення частинок. Оскільки міжповерхневий натяг сповільнює цей процес, то мікронеоднорідний розплав може зберігатися навіть за досить високих температур.

У роботі [17] на базі розплаву евтектичного складу системи Pb–Sn оцінено межі мікронеоднорідної стабільності в евтектичних розплавах. Дослідження інших подібних систем показали, що температурні інтервали виявлених аномалій свідчать про те, що в евтектичних системах максимум температури на спінодалі може суттєво перевищувати значення $2T_{eut}$.

Поведінка досліджених властивостей засвідчує, що евтектичний розплав є мікрогетерогенним і подібним до монотектичного [18–23]. Однак початок кристалізації в евтектиках не дає змоги чітко спостерігати тенденцію до поділу фаз у рідкому стані. Тому за температур, що суттєво перевищують критичні, розплави є макроскопічно гомогенними, а всі наявні неоднорідності описуються пуассонівськими флуктуаціями концентрації з малою довжиною фазової когерентності. При цьому однаково важливу роль відіграють як електронно-іонні взаємодії, що стабілізують систему проти поділу фаз, так і електрон-електронні взаємодії, наявністю яких зумовлене екранування електростатичних сил у системі. У разі зниження температури ця макроскопічна гомогенність деякий час зберігається, але під час наближення до критичної області об'ємна доля мікронеоднорідностей з різною концентрацією компонентів починає зростати. Односортні взаємодії починають переважати.

Реакція електронної підсистеми на температурні зміни є швидшою за реакцію іонної, що виявляється в концентраційній зміні радіуса екранування. Утворена просторова неоднорідність електронного газу є причиною нестабільності в системі і сприяє розвитку флуктуацій концентрацій у білякритичній області. Як наслідок, виникають мікроскопічні кластери, які зростають під час наближення до температури розшарування.

В евтектичних системах, що розглянені, як окремий випадок систем з обмеженою розчинністю компонентів, розміри частин однієї з фаз, змінюючись за зміни температури, не досягають таких розмірів, як у монотектичних системах, тобто їхня седиментаційна стійкість зберігається до температури початку кристалізації.

4. Висновки

Проведено дослідження температурних залежностей в'язкості, електропровідності та термо-ерс потрійних іонних рідинних систем NaF–LiF–LaF₃ і NaF–LiF–NdF₃ та потрійних металевих розплавів систем Pb–Bi, Pb–Mg, Bi–Sn, Bi–Pb–Sn евтектичного складу в широкому температурному інтервалі, що включає температури плавлення. Проведено порівняння фізичних властивостей досліджених іонних рідинних систем з металевими розплавами. Показано, що в сольових розплавах суттєву роль відіграють іонні та електрон-іонні взаємодії, тоді як у металевих розплавах крім електрон-іонної взаємодії важлива роль належить електрон-електронній взаємодії.

Роботу виконано за підтримки Міністерства освіти і науки України та Державного фонду фундаментальних досліджень ДФФД.

1. Л.А. Булавін, В.І. Лисов, С.І. Рево та ін., *Фізика іонно-електронних рідин* (Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет", Київ, 2008).
2. І.І. Адаменко, Л.А. Булавін, *Фізика рідин та рідинних систем* (АСМІ, Київ, 2006).
3. Н.А. Азаренков, Л.А.Булавин, И.И. Залюбовський, *Ядерная энергетика* (ХНУ ім. В.Н. Каразіна, Харків, 2012).
4. Л.А.Булавин, В.К. Тартаковський, *Ядерна фізика* (Знання, Київ, 2006).
5. S. Mudry, V Sklyarchuk, and Yakymovych, *J. Phys. Studies*. **12**, 1601 (2008).

6. Yu. Plevachuk and V. Sklyarchuk, *Meas. Sci. Technol.* **12**, 23 (2001).
7. Л.А. Булавін, Ю.О. Плевачук, В.М. Склярчук, А.О. Омельчук, Н.В. Файдюк, Р.М. Савчук, *Ядерна фізика та енергетика* **14**, 154 (2013).
8. L. Bulavin, Yu. Plevachuk, V. Sklyarchuk, A. Omelchuk, N. Faidiuk, R. Savchuk, I. Shtablavyu, and V. Vus, *Nucl. Eng. Des.* **270**, 60 (2014).
9. Е.Г. Швидковский, *Некоторые вопросы вязкости расплавленных металлов* (Гостехиздат, Москва, 1955).
10. L.A. Bulavin, A.O. Omelchuk, N.V. Faidyuk, V.M. Sklyarchuk, Y.O. Plevachuk, V.S. Kopan, and R.N. Savchuk, *Ukrainian Journal of Physics* **59(8)**, 769 (2014).
11. L. Bulavin, Y. Plevachuk, V. Sklyarchuk, I. Shtablavyu, N. Faidiuk, and R. Savchuk, *J. Nucl. Mater.* **433**, 329 (2013).
12. I. Kaban, W. Hoyer, Yu. Plevachuk, and V. Sklyarchuk, *J. Phys.: Condens. Matter*, **16**, 6335 (2004).
13. Yu. Plevachuk, V. Sklyarchuk, S. Eckert, and G. Gerbeth, *J. Nucl. Mater.* **373**, 335 (2008).
14. Yu. Plevachuk, V. Sklyarchuk, G. Gerbeth, and S. Eckert, *Int. J. Mater. Res.*, **101(7)**, 839 (2010).
15. Yu. Plevachuk, V. Sklyarchuk, A. Yakymovych, and G. Gerbeth, *J. Non-Cryst. Solids*. **354**, 4443 (2008).
16. Yu. Plevachuk, V. Sklyarchuk, A. Yakymovych, B. Willers, and S. Eckert, *J. Alloy Compd.*, **394/1-2**, 63 (2005).
17. В. Склярчук, А. Якимович, І. Штаблавий, І. Швернога, М. Козловський, Р. Хайрулін, С. Станкус, *УФЖ* **55(9)**, 980 (2010).
18. B. Sokolovskii, Yu. Plevachuk, and V. Didoukh, *Phys. Stat. Sol. (a)* **148**, 123 (1995).
19. V. Didoukh, Yu. Plevachuk, and B. Sokolovskii, *J. Phase Equilib.* **17(5)**, 414 (1996).
20. H. Neumann, Yu. Plevachuk, and F. Allenstein, *Mater. Sci. Eng. A* **361(1-2)**, 155 (2003).
21. Yu. Plevachuk, V. Sklyarchuk, O. Alekhin, and L. Bulavin, *J. Mol. Liq.*, **127**, 33 (2006).
22. Yu.O. Plevachuk, V.M. Sklyarchuk, O.D. Alekhin, and L.A. Bulavin, *J. Phys. Studies*, **9(4)**, 333 (2005).
23. Yu. Plevachuk, V. Sklyarchuk, O. Alekhin, O. Bilous, L. Bulavin, *J. Non-Cryst. Solids*, **353**, 3310 (2007).

Одержано 15.06.15

*В.М. Склярчук, Ю.О. Плевачук,
А.О. Омельчук, Н.В. Файдюк*

**ВЯЗКОСТЬ, ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ,
ТЕРМО-ЭДС ИОННЫХ И ИОННО-ЭЛЕКТРОННЫХ
ЖИДКОСТНЫХ СИСТЕМ ЭВТЕКТИЧЕСКОГО
СОСТАВА**

Резюме

Исследованы и сравнены температурные зависимости вязкости, электропроводности и термо-эдс ионных и ионно-электронных жидкостных систем эвтектического и около-эвтектического составов в широком температурном интервале, включающем температуры плавления этих сплавов.

*V.M. Sklyarchuk, Yu. O. Plevachuk,
A. O. Omelchuk, N. V. Faidiuk*

**VISCOSITY, CONDUCTIVITY,
AND THERMOELECTRIC POWER IN IONIC
AND ION-ELECTRON EUTECTIC LIQUID SYSTEMS**

S u m m a r y

The temperature dependences of viscosity, conductivity, and thermoelectric power in ionic and ion-electron liquid systems with eutectic and near-eutectic compositions have been studied and compared in a wide temperature interval, which includes the melting temperatures of the examined alloys.