

<https://doi.org/10.15407/plit2023.04.028>

**УДК 621.746.75.04:620.18**

**В.В. Христенко**, канд. техн. наук, доцент; e-mail: kvad63@meta.ua

**М.В. Аршук**, канд. техн. наук, доцент; e-mail: arshuk\_maryna@ukr.net

**А.С. Бондарчук**, студент; e-mail: andriybondarchuk@meta.ua

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

## РЕЗИСТОМЕТРИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ У РОЗПЛАВАХ СИСТЕМИ Al–Si

Результати попередніх термодинамічних розрахунків не виключають можливості температурно спричинених змін будови розплавів системи Al–Si. Раніше також установлено, що схильність розплавів зазначеної системи до зміни будови при зміні температури найвиразніше повинна проявлятися у заевтектичних сплавах. У цій роботі зроблено спробу експериментально оцінити можливість зміни будови розплавів системи Al–Si шляхом дослідження температурних залежностей такої структурно чутливої властивості, як електричний опір, а також установити температурні межі, у яких будова зазначеного розплаву залишається сталою; за допомогою аналізу будови зовнішніх електронних оболонок іонів компонентів схарактеризовано можливі будови мікрообластей розплаву в температурних інтервалах, які відповідають характерним відрізням політермі електричного опору. Досліджено політерму електричного опору заевтектичного алюмінієво-кремнієвого сплаву, що містить 17,6 мас. % (17,1 ат. %) кремнію, в інтервалі температур від 650 °C (дещо вище за температуру ліквідусу) до майже 1150 °C із кроком 15 °C. Електричний опір визначено методом вольтметра-амперметра з чотиризондовою схемою підключення. Установлено, що політерма електричного опору досліджуваного сплаву має немонотонний характер. Наявність на кривій температурної залежності електричного опору низки перегинів при температурах приблизно 750 °C, 820 °C та 960 °C дозволяє зробити висновок про можливість температурно спричинених змін будови розплавів системи Al–Si. Можна припустити, що при температурах, які незначно перевищують температуру ліквідусу, будова розплаву подібна до будови емульсії. При цих температурах розплав утворений двома видами угруповань: угрупованнями, утвореними в основному атомами алюмінію з металічним типом зв'язку між ними, і угрупованнями, утвореними атомами кремнію з переважаючим ковалентним зв'язком. При подальшому підвищенні температури ковалентні зв'язки руйнуються, атоми кремнію іонізуються до металічного стану, і розплав поступово переходить до істинно гомогенного стану.

**Ключові слова:** алюміній, кремній, термодинамічна рівновага, розплав, електричний опір.

### Вступ

Перспективним методом покращення механічних властивостей сплавів системи Al–Si може бути термочасова обробка. Покращення механічних властиво-

стей унаслідок перегрівання і витримки розплаву при певній температурі зазвичай пов'язують зі зміною його будови. Проте нині не існує узагальнених методів визначення температурних і часових параметрів такої обробки. Тому для усвідомленого підходу до вибору параметрів термочасової обробки потрібно отримати додаткові дані про можливі температурно спричинені зміни будови як розплавів загалом, так і силумінів зокрема.

Наразі переважають уявлення, що металічні розплави евтектичних систем, принаймні поблизу температури ліквідусу, складаються з мікрообластей, у яких переважно концентрується один із компонентів [1–7] (таку будову часто називають квазіевтектичною). Розміри таких областей можуть досягати десятків нанометрів, що суттєво перевищує масштаб близького впорядкування в розплавах [3, 4]. Це дало змогу припустити, що речовини, які утворюють систему евтектичного типу, обмежено взаємно розчинні не тільки у твердому, але й — у певному інтервалі температур — у рідкому стані, а перетворення в будові розплавів можуть бути пов'язані з температурно спричиненими змінами меж взаємної розчинності компонентів [8–10].

Стосовно системи Al–Si результати попередніх термодинамічних розрахунків [11] принаймні не спростовують тезу про мікрогетерогенну будову та ймовірність структурних перетворень в її розплавах. Експериментально зміни будови розплаву фіксують за наявністю особливих точок на політермах структурно чутливих властивостей. Тому видається доцільним емпірично оцінити можливість зміни будови розплавів зазначеної системи за допомогою дослідження температурних залежностей такої структурно чутливої властивості, як електричний опір.

У [11] показано, що для системи Al–Si рівновагу між твердим розчином на основі кремнію та рідкою фазою можна описати із застосуванням кожного з двох різних наборів термодинамічних параметрів розплаву. Водночас рівновага між твердим розчином на основі алюмінію і рідкою фазою адекватно описується лише із застосуванням тільки одного із зазначених наборів. Це дало змогу припустити, що схильність розплавів системи Al–Si до зміни будови при зміні температури найвиразніше повинна проявлятися в заевтектичних сплавах.

*Мета роботи* полягала у розв'язанні кількох задач: 1) за результатами дослідження температурної залежності електричного опору розплаву системи Al–Si заевтектичного складу експериментально підтвердити (або спростувати) можливість температурно спричинених змін його будови;

2) за координатами особливих точок політерми електричного опору встановити температурні межі, у яких будова зазначеного розплаву залишається сталою (або принаймні відсутні її різкі зміни);

3) за допомогою аналізу будови зовнішніх електронних оболонок іонів компонентів (з урахуванням можливих ступенів іонізації) оцінити можливі будови мікрообластей розплаву в температурних інтервалах, які відповідають характерним відріzkам політерми електричного опору.

### *Матеріали та методи дослідження*

Для дослідження політерми електричного опору застосовано сплав системи Al–Si, що містить 17,6 мас. % (17,1 ат. %) кремнію. Сплав виплавляли в електричній печі опору в алундовому тиглі під шаром флюсу ( $KCl : NaCl = 1 : 1$ ). Як шихтові матеріали застосовано електротехнічний (провідниковий) алюміній і кремній кристалічний.

Електричний опір зразків визначали методом вольтметра — амперметра з чотиризондовою схемою підключення за допомогою комплексу апаратури [12]. Для резистометричних досліджень розплав заливали в порожнину фторлоповітової вимірювальної комірки. Після охолодження до кімнатної температури комірку поміщали в нагрівальний пристрій таким чином, щоб активна ділянка зразка (з якої знімається різниця електричних потенціалів) розташовувалась у середній (ізотермічній) області. Для запобігання розчинення застосовано вивідні електроди із вольфрамового дроту, а саму комірку сконструйовано таким чином, щоб місця контакту електродів зі сплавом перебували за межами нагрівального пристрою.

Розплав нагрівали в інтервалі від 650 °C (дещо вище за температуру ліквідусу) до майже 1150 °C із кроком по температурі 15 °C. Результати вимірювань записували після стабілізації величини опору в процесі ізотермічної витримки при заданій температурі. У кожному конкретному випадку тривалість стабілізації не перевищувала 30 хв.

### *Результати й обговорення*

Установлено, що політерма електричного опору досліджуваного сплаву має немонотонний характер (рисунок). Відомо [13, 14], що навіть при плавленні між атомами кремнію руйнуються далеко не всі ковалентні зв'язки. Якщо виходити з положення, що розплави системи Al–Si не є істинними розчинами, можна припустити, що принаймні при температурах, які незначно перевищують температуру ліквідусу, на мікрорівні будова розплаву подібна до будови емульсії (в «дисперсійному середовищі», яке утворене переважно атомами алюмінію, розподілені мікрогрупування, які складаються переважно з атомів кремнію – «дисперсна фаза»).

Початкова ділянка політерми (до температури приблизно 750 °C, на рис. 1, а) має лінійний характер залежності опору від температури (виразніше лінійність ідентифікується за значеннями першої і другої похідних від функції температурної залежності опору, рис. 1б, в). Такий характер температурної залежності опору може свідчити про несуттєвий вплив підвищення температури на ступінь руйнування ковалентних зв'язків між атомами кремнію, а отже — і про практичну відсутність змін (як мінімум про відсутність різких змін) будови розплаву. Послугуючись класичною теорією електропровідності, можна припустити, що аж до 740–760 °C опір розплаву збільшується тільки внаслідок збільшення ступеня розсіювання носіїв заряду (електронів) через збільшення амплітуди коливань і швидкості руху атомів.

Нелінійність температурної залежності електричного опору в інтервалі від 760 °C до 815–830 °C можна пояснити змінами, які відбуваються в будові розплаву. Прискорене збільшення опору з температурою (на цій ділянці політерма опукла донизу: перша та друга похідні додатні), можна пов'язати зі збільшенням ступеня розсіювання вільних носіїв заряду не тільки через збільшення амплітуди коливань і швидкості руху атомів, але й через відчутне збільшення кількості розчиненого елемента в «дисперсійному середовищі» внаслідок зменшення кількості «дисперсної фази». Тому слід очікувати, що в зазначеному інтервалі температур уже помітна кількість атомів кремнію внаслідок розриву ковалентних зв'язків переходить (іонізується) в металічний стан.

Привертає увагу наявність ділянки політерми, на якій опір не змінюється зі збільшенням температури (практично горизонтальний відрізок в інтервалі температур 830–965 °C, перша похідна від температурної залежності опору рівна 0, рис. 1). Сталість електричного опору в зазначеному інтервалі температур можна пояснити інтенсивним руйнуванням ковалентних зв'язків між атомами кремнію. Руйнування ковалентних зв'язків, перехід атомів кремнію в металічний стан і колективізація валентних електронів супроводжуються збільшенням кількості вільних носіїв заряду. Тому збільшення ступеня розсіювання носіїв заряду при нагріванні від 830 °C до 965 °C може компенсуватися збільшенням їх числа, і як наслідок, при підвищенні температури опір розплаву практично не збільшується. Значна (понад 130 °C) температурна протяжність горизонтальної ділянки політерми опору розплаву (рис. 1) може свідчити про остаточне руйнування ковалентних зв'язків між атомами кремнію в інтервалі температур 830–965 °C.

Для атомів кремнію можливі два стійкі ступені іонізації до металічного стану:  $\text{Si}^{2+}$  із сферично симетричною  $3\text{S}^2$  зовнішньою електронною оболонкою та  $\text{Si}^{4+}$  із зовнішньої  $2\text{p}^6$  ортогональною шістькою електронів [13]. Власна іонізувальна здатність алюмінію достатня лише для іонізації його атомів до стану  $\text{Al}^{2+}$  [14, 15]. Такі іони зі сферично симетричними  $3\text{S}^1$  зовнішніми електронними оболонками в розплаві утворюють області локального порядку, будова яких характеризується координаційним числом 12. Очевидно, що іонізувальної здатності алюмінію достатньо для іонізації атомів кремнію, що входять до складу областей локального порядку на основі алюмінію, лише до стану  $\text{Si}^{2+}$  (при дуже близьких зарядах ядер атомів алюмінію і кремнію

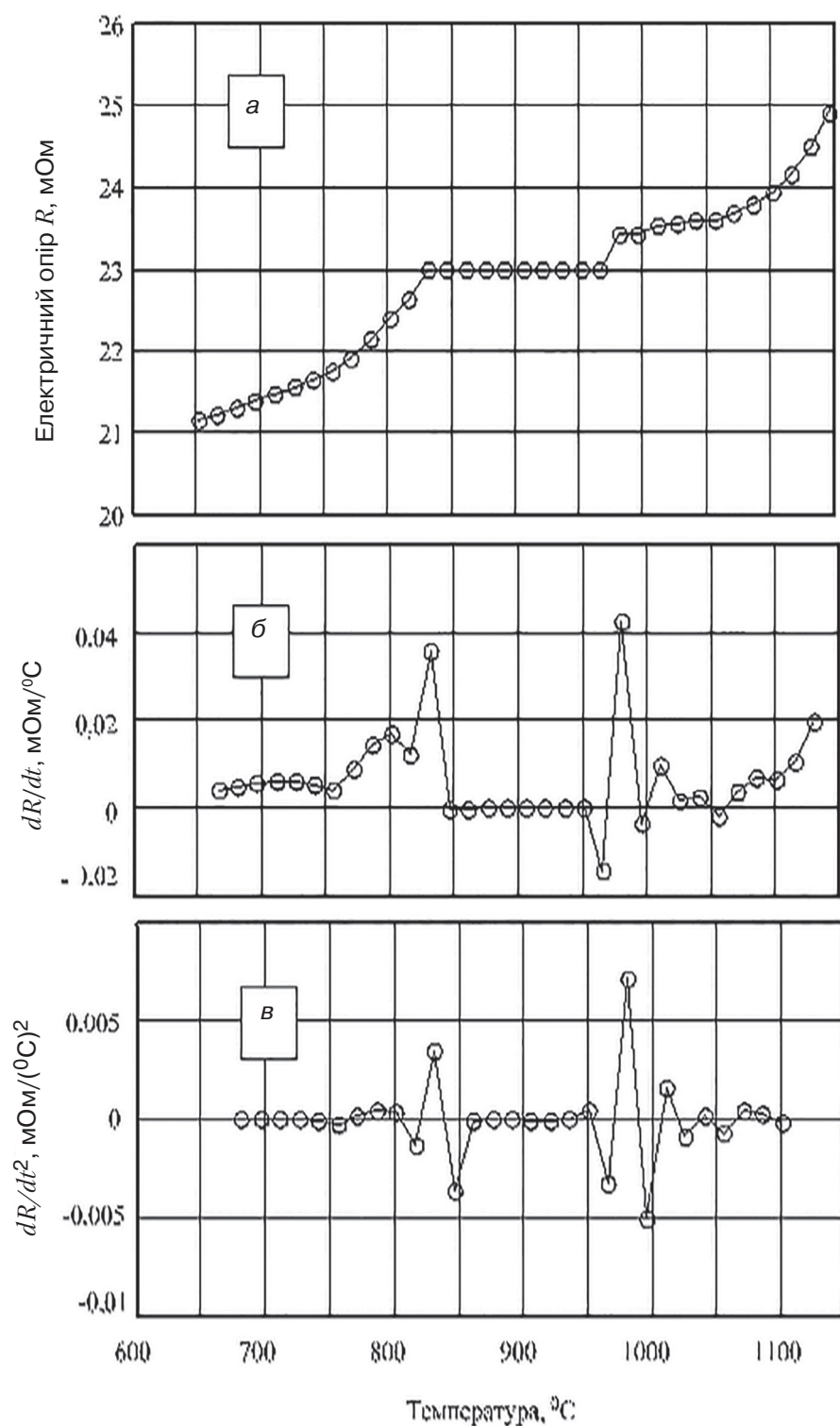


Рис. 1. Температурна залежність електричного опору розплаву системи Al-Si (а); перша похідна по температурі від електричного опору (б); друга похідна по температурі від електричного опору (в)

— відповідно 13 і 14 — значення їхніх других іонізаційних потенціалів становлять відповідно 18,82 і 16,34 еВ, а третіх іонізаційних потенціалів — відповідно 28,44 і 33,46 еВ [16]). У межах припущення про подібність будови розплаву до будови емульсії можна стверджувати, що після переходу всіх атомів кремнію в металічний стан «дисперсійне середовище» утворене переважно іонами алюмінію  $Al^{2+}$  та певною кількістю іонів кремнію  $Si^{2+}$ , відповідно, зі сферично симетричними  $3S^1$  і  $3S^2$  зовнішніми електронними оболонками (алюміній є основою сплаву). А будова його областей локального порядку характеризується координаційним числом 12.

Якщо в розплаві для атомів кремнію можлива іонізація до другого стійкого стану  $Si^{4+}$ , то такі іони із зовнішніми  $2p^6$  ортогональними шістьками електронів утворюють угруповання, будова яких характеризується координаційним числом 8. Іонізувальна здатність мікроугруповань іонів  $Si^{4+}$  має бути достатньою для іонізації атомів алюмінію до другого стійкого іонізованого стану  $Al^{3+}$  з  $2p^6$  зовнішніми ортогональними шістьками електронів (четвертий іонізаційний потенціал атомів кремнію становить 45,13 еВ, а третій іонізаційний потенціал атомів алюмінію — 28,44 еВ [16]). Іони  $Si^{4+}$  і  $Al^{3+}$  з  $2p^6$  зовнішніми ортогональними шістьками електронів у розплаві утворюють мікроугруповання («дисперсну фазу»), будова яких характеризується координаційним числом 8.

Таким чином, після повного розриву ковалентних зв'язків і переходу всіх атомів кремнію до металічного стану у розплавах системи Al–Si можливе існування двох видів угруповань: з будовою областей локального порядку, яка характеризується координаційним числом 12, і з будовою областей локального порядку, яка характеризується координаційним числом 8. Наявність двох доволі стійких ступенів іонізації алюмінію ( $Al^{2+}$  і  $Al^{3+}$ ) і кремнію ( $Si^{2+}$  і  $Si^{4+}$ ) допускає можливість переходу атомів компонентів із угруповань одного типу в угруповання з іншим характером взаємодії (динамічна рівновага). Тим самим здійснюється тісна взаємодія між ними. Унаслідок такої взаємодії значно зменшується енергія на поверхні розділу між угрупованнями. Тому угруповання різного типу утворюють єдину «конструкцію» і у звичайних умовах помітне седиментаційне розшарування розплаву не відбувається. Такій нерозшарованій будові відповідає більша величина ентропії, а отже — і менші значення вільної енергії розплаву.

Наявність ще однієї особливої точки на політермі електричного опору дозволяє вважати, що при температурі близько 1000 °C завершується повна іонізація атомів компонентів до станів  $Al^{3+}$  та  $Si^{4+}$ . Слід очікувати, що при температурах, які перевищують 1000 °C, розплав складається із угруповань, утворених іонами із зовнішніми ортогональними шістьками електронів. Тому вони мають однакову будову (яка характеризується координаційним числом 8) і різняться тільки за складом. Про це опосередковано може свідчити прискорене збільшення опору розплаву з ростом температури на ділянці політерми в області температур від 1000 °C до 1150 °C (ділянка кривої опукла донизу, перша й друга похідні — додатні, рис. 1). У зазначеному діапазоні температур прискорений ріст електричного опору пояснюється збільшенням ступеня розсіювання носіїв заряду не тільки внаслідок збільшення амплітуди коливань атомів, але й внаслідок збільшення вмісту розчинених елементів у «дисперсійному середовищі». Розплав поступово переходить до будови зі статистичним розподілом атомів.

### Висновки

1. Результати аналізу температурної залежності електричного опору розплаву Al + 17,6 % Si свідчать про можливість температурно спричинених змін будови розплавів системи Al–Si. Наявність на політермі кількох особливих точок дає підстави вважати, що при температурах близько 750 °C, 830 °C та 960 °C будова зазначеного розплаву зазнає суттєвих змін.

2. За результатами аналізу будови зовнішніх електронних оболонок іонів компонентів (з урахуванням можливих ступенів іонізації атомів) можна стверджувати, що при температурах, які незначно перевищують температуру ліквідусу, розплав

утворений двома видами угруповань: угрупованнями, утвореними в основному атомами алюмінію з металічним типом зв'язку між ними, і угрупованнями, утвореними атомами кремнію з переважаючим ковалентним зв'язком. При подальшому підвищенні температури ковалентні зв'язки руйнуються, атоми кремнію іонізуються до металічного стану і розплав поступово переходить до істинно гомогенного стану.

Через обмежену стійкість матеріалу вимірювальної комірки політерми електричного опору розплаву при температурах, що перевищують 1150 °С, досліджено не було. Тому на підставі результатів даної роботи вичерпну відповідь на питання про температуру цілковитого переходу розплаву до стану істинного розчину отримати не вдалося.

У подальшому видається доцільним за допомогою резистометричних досліджень експериментально з'ясувати, наскільки зміни, що відбулися при перегріванні розплаву, зберігаються при подальшому його охолодженні. Також корисно дослідити вплив перетворень, які відбулися в розплаві при його перегріванні до відповідних характерних температур, на структуру сплаву в твердому стані. Окрім того, зовсім незайвою може бути спроба в рамках теорії асоційованих розчинів детально оцінити спільний вплив складу і температури на будову розплавів системи Al–Si (установити температурно-концентраційні залежності асоціативного складу розплавів зазначеної системи).

### Список літератури

- 1 Баум Б.А. Металлические жидкости. Москва: Наука, 1979. 120 с.
- 2 Залкин В.М. Природа заэвтектических сплавов и эффект контактного плавления. Москва: Металлургия, 1987. 152 с.
- 3 Гаврилин И. В. Седиментационный эксперимент при изучении жидких сплавов. Известия АН СССР. *Металлы*, 1985, № 2. С. 66–73.
- 4 Вертман А.А., Измайлов В.А., Самарин А.М. Центрифугирование силумина в жидком состоянии. *Доклады АН СССР*, 1970, т. 190, № 2. С. 313–314.
- 5 Глазов В.М., Шишкин А. В., Комарницкий М. С. Рентгенографическое исследование структуры расплавов в системах Sn–Te и Pb–Te. *Журнал физической химии*. 1990. т. 64. № 12. С. 3232–3300.
- 6 Бертенев Г.М. О квазиэвтектическом строении жидкой эвтектики. Известия АН СССР. ОН. *Металлургия и топливо*. 1961. № 3. С. 138–140.
- 7 Данилов В.И. Кристаллизация и структура жидкостей. Киев: Наукова думка, 1956. 413 с.
- 8 Залкин В.М. О равновесности коллоидного строения расплавов в эвтектических системах. *Журнал физической химии*. 1991. т. 65. № 8. С. 2295–2298.
- 9 Залкин В.М. О природе эвтектик. *Журнал физической химии*. 1966. № 8. С. 2655–2685.
- 10 Залкин В.М. О современном состоянии теории эвтектик. *Журнал физической химии*. 1984. т. 58, № 6. С. 1320–1328.
- 11 Христенко В.В., Термодинамическая оценка вероятности структурных неоднородностей расплавов системы Al–Si. *Процессы литья*. 2004. № 1. С. 26–34.
- 12 Христенко В.В., Терновой С.А. Комплект лабораторного оборудования для исследования полиTERM электропроводности металлов и сплавов. Тезисы докладов международной научно-технической конференции «50 лет в Академии наук Украины: ИЛП, ИПЛ, ФТИМС – прошлое, настоящее, будущее. Киев: Редакция журнала «Процессы литья» при участии МП «Информлитъ», 2008. С. 129–131.
- 13 Григорович В.К. Периодический закон Менделеева и электронное строение металлов. Москва: Наука, 1966. 279 с.
- 14 Регель А.Р., Глазов В.М. Периодический закон и физические свойства электронных расплавов. Москва: Наука, 1979. 309 с.

- 15 Григорович В.К. Структура жидких металлов в связи с их электронным строением. Известия АН СССР. ОТН. *Металлургия и топливо*. 1960. № 6. С. 93–109.
- 16 Свойства элементов: в 2-х томах. Т. 1: Физические свойства / под ред. Самсонова. Москва: Металлургия, 1976. 600 с.

Надійшла 23.07.2023

### References

- 1 Baum B.A. (1979) Metallic liquids. Moscow: Nauka, 120 p. [in Russian].
- 2 Zalkin V.M. (1987) The nature of hypereutectic alloys and the effect of contact melting. Moscow: Metallurgiya, 152 p. [in Russian].
- 3 Gavrilin I.V. (1985). Sedimentation experiment in liquid alloys study. *Izvestiya AN SSSR. Metally*, no. 2, pp. 66–73 [in Russian].
- 4 Vertman A.A., Izmailov V. A., Samarin A. M. (1970). Centrifugation of silumin in a liquid state. *Doklady AN SSSR*, v. 190, no 2, pp. 313–314 [in Russian].
- 5 Glazov V.M., Shishkin A. V., Komarnitsky M. S. (1990). X-ray study of melts structure in Sn–Te and Pb–Te systems. *Zhurnal fizicheskoy khimii*, v. 64, no 12, pp. 3232–3300 [in Russian].
- 6 Bertenev G.M. (1961). On quasi-eutectic structure of liquid eutectic. *Izvestiya AN SSSR. OTN. Metallurgiya i toplivo*, no 3, pp. 138–140 [in Russian].
- 7 Danilov V. I. (1956). Crystallization and structure of liquids. Kyiv: Naukova dumka, 413 p. [in Russian].
- 8 Zalkin V.M. (1991). On the equilibrium of melts colloidal structure in eutectic systems. *Zhurnal fizicheskoy khimii*, v. 65, no. 8, pp. 2295–2298 [in Russian].
- 9 Zalkin V.M. (1966). On nature of eutectics. *Zhurnal fizicheskoy khimii*, no. 8, pp. 2655–2685 [in Russian].
- 10 Zalkin V.M. (1984). On the current state of the theory of eutectics. *Zhurnal fizicheskoy khimi*, v. 58, no 6, pp. 1320–1328 [in Russian].
- 11 Khrystenko V.V., Kirievsky B.A. (2004) Thermodynamics estimation of Al–Si system melts probability of structural inhomogeneities. *Processy lit'ia*, no 1, pp. 26–34 [in Russian].
- 12 Khrystenko V.V., Ternovoy C.A. (2008) Set of laboratory equipment for research of metals and alloys conductivity polythermes. Theses of international scientific and technical conference are “50 in Academy of sciences of Ukraine: past, present, future”. Kyiv: Release of “Processy lit'ia” magazine, pp. 129–131 [in Russian].
- 13 Grigorovich V.K. (1966) Mendeleev Periodic law and electronic structure of metals. Moscow: Nauka, 279 p. [in Russian].
- 14 Regel' A.R., Glazov V.M. (1979) Periodic law and physical properties of electronic fusions. Moscow: Nauka, 309 p. [in Russian].
- 15 Grigorovich V.K. (1960) Structure of liquid metals in connection with their electronic structure. *Izvestiya AN SSSR. OTN. Metallurgia i toplivo*, no 6, pp. 93–109 [in Russian].
- 16 Samsonov G.V. (Eds.) (1976) Properties of elements. Moscow: Metallurgiya, 600 p. [in Russian].

Received 23.07.2023

**V.V. Khrystenko**, PhD (Engin), Senior Researcher; e-mail: kvad63@meta.ua

**M.V. Arshuk**, PhD (Engin), Senior Researcher; e-mail: arshuk\_maryna@ukr.net

**A.S. Bondarchuk**, Student; e-mail: andriybondarchuk@meta.ua

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

### RESISTOMETRIC STUDIES OF STRUCTURAL TRANSFORMATIONS IN MELTS OF Al–Si SYSTEM

*The results of previous thermodynamic calculations do not exclude the possibility of temperature-induced changes in Al–Si system melts structure. It was also established previously that the tendency of this system melts to structure change when temperature is changed should be most clearly detected in the hypereutectic alloys. In this paper, an attempt was made to experimentally evaluate the possibility of Al–Si system melts structure changing by means studying the temperature dependence of such a structure-sensitive property as electrical resistance, as well as to establish temperature limits in which the structure of the specified melt remains stable; using analysis of components ions outer electron shells structure, the possible structures of melt microregions were characterized in the temperature intervals that correspond to the characteristic segments of electrical resistance polytherm. The electrical resistance polytherm of hypereutectic aluminum-silicon alloy containing 17,6 wt. % (17,1 at. %) of silicon has been investigated in temperature range from 650 °C (slightly higher than the liquidus temperature) to almost 1150 °C with a step of 15 °C. Electrical resistance was determined by the voltmeter-ammeter method with a four-probe connection scheme. It was established that the electrical resistance polytherm of investigated alloy has a non-monotonic character. The presence of inflections on electrical resistance temperature dependence curve at temperatures approximately 750 °C, 820 °C and 950 °C allows conclude about possibility of temperature-induced changes in Al – Si system melts structure. It can be assumed that at temperatures that slightly exceed the liquidus temperature, the structure of the melt is similar to structure of an emulsion. At these temperatures, the melt is formed by two types of groups: groups formed mainly by aluminum atoms with a metallic type of bond, and groups formed by silicon atoms with a predominant covalent bond. With a further increasing of temperature, covalent bonds are destroyed, silicon atoms are ionized to a metallic state, and the melt gradually transit to a truly homogeneous state.*

**Keywords:** aluminum, silicon, thermodynamic equilibrium, melts, electrical re-sistance.

### *До уваги авторів*

У зв'язку з переходом журналу «Процеси лиття» на новітню платформу Open Journal Systems та відповідним оновленням сайту журналу прохання при подачі статей користуватися сайтом <https://plit-periodical.org.ua/>

Після реєстрації в системі вам буде запропоновано покрокову процедуру завантаження статті за стандартами міжнародних журналів.

Для спілкування з редакцією та подання статей в перехідний період користуйтеся тільки **plit.periodical@gmail.com**

*Редакція журналу «Процеси лиття»*