

23. Kutsova V.Z., Nosko O.A. and Sylkin A.S. *Fazovy perehody v napivprovodnikah (kremnii, germanii) ta splavah na ih osnovi* [Phase transitions in semiconductors (silicon, germanium) and alloys on their basis]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metal Science and Heat Treatment of Metals]. 2011, no. 1–2, pp. 49–53. (in Ukrainian)

*Статья рекомендована к публикации д-ром техн. наук, проф. В. З. Куцовой (Украина), д-ром техн. наук, проф. В. И. Мазуром (Украина).*

Поступила в редколлегию 22.03.2017

Принята в печать 25.03.2017

УДК 669.017

## ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ НА СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ИЗНОСОСТОЙКОГО ВЫСОКОКРЕМНИСТОГО СИЛУМИНА АЛЬРЕЗИСТ

РОМАНОВА Н. С.<sup>1\*</sup>, к. т. н., доц.,  
ИОНОВА Л. Ю.<sup>2</sup>, к. т. н., доц.

<sup>1\*</sup> Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, Днепр, 49005, Украина, тел. +38 (097) 523-52-58, e-mail: [msrms@i.ua](mailto:msrms@i.ua), ORCID ID: 0000-0002-3211-8009

<sup>2</sup> Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, Днепр, 49005, Украина, тел. +38 (056) 745-31-56; e-mail: [kaf.material@metal.nmetau.edu.ua](mailto:kaf.material@metal.nmetau.edu.ua), ORCID ID: 0000-0002-8763-0771

**Аннотация. Постановка проблемы.** Исследование закономерностей формирования структурно-фазового состава сложнолегированных сплавов на основе Al при кристаллизации со скоростями охлаждения  $10^3 \dots 10^5$  °/с позволяет изменять свойства этих сплавов в довольно широких пределах. Результаты исследований бинарных сплавов алюминия, полученных при кристаллизации в указанном диапазоне скоростей охлаждения, трактуются рядом авторов на основе формирования метастабильных фазовых диаграмм, которые формируются путем экстраполяции линий фазового равновесия в области переохлажденного состояния. **Цель работы** – проанализировать результаты металлографического и рентгенофазового анализов первичного и гранулированного высококремнистого силумина Альрезист в рамках представлений формирования метастабильных фазовых диаграмм на основе тройной системы Al – Si – Fe. **Результаты и их обсуждение.** Анализ научных публикаций показывает, что для двойных сплавов с эвтектическим или перитектическим равновесием при скоростях охлаждения  $10^3 \dots 10^5$  °/с образуются anomalно пересыщенные твердые растворы со стороны алюминия, которые трактуются как метастабильные. Они кристаллизуются в соответствии с метастабильными фазовыми диаграммами. Показано, что anomalно пересыщенные твердые растворы алюминия наблюдаются для бинарных систем с промежуточными соединениями. Проанализированы результаты микроструктурного и фазового анализа гранулированного сложнолегированного силумина на основе тройной фазовой диаграммы Al – Si – Fe. **Выводы.** Установлено, что при кристаллизации гранул подавляется выделение из расплава промежуточных интерметаллидов и значительно увеличивается объемная доля  $\alpha$ -Al твердого раствора. Полученные данные подтверждают экстраполяции поверхности ликвидус в область переохлаждения при подавлении кристаллизации промежуточных фаз в трехкомпонентной системе Al – Si – Fe. Рассмотрена схема формирования метастабильной диаграммы на основе трехкомпонентной системы Al – Si – Fe с образованием anomalно пересыщенного метастабильного твердого раствора алюминия.

**Ключевые слова:** сплавы на основе алюминия; метастабильная кристаллизация; метастабильная фазовая диаграмма; anomalно пересыщенный твердый раствор; анализ фазового состава

## ВПЛИВ ШВИДКОСТІ ОХОЛОДЖЕННЯ У ПРОЦЕСІ КРИСТАЛІЗАЦІЇ НА СТРУКТУРНО-ФАЗОВИЙ СКЛАД ЗНОСОСТІЙКОГО ВИСОКОКРЕМНИСТОГО СИЛУМІНУ АЛЬРЕЗИСТ

РОМАНОВА Н. С.<sup>1\*</sup>, к. т. н., доц.,  
ІОНОВА Л. Ю.<sup>2</sup>, к. т. н., доц.

<sup>1\*</sup> Кафедра матеріалознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, Дніпро, 49005, Україна, тел. +38 (056) 745-31-56; e-mail: [msrms@i.ua](mailto:msrms@i.ua), ORCID ID: 0000-0002-3211-8009

<sup>2</sup> Кафедра матеріалознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, Дніпро, 49005, Україна, тел. +38 (056) 745-31-56; e-mail: [kaf.material@metal.nmetau.edu.ua](mailto:kaf.material@metal.nmetau.edu.ua), ORCID ID: 0000-0002-8763-0771

**Анотація. Постановка проблеми.** Дослідження закономірностей формування структурно-фазового складу складнолегованих сплавів на основі Al у процесі кристалізації зі швидкостями охолодження  $10^3 \dots 10^5$  °/с дозволяє змінювати властивості цих сплавів у досить широких межах. Результати досліджень бінарних сплавів алюмінію, отриманих під час кристалізації в зазначеному діапазоні швидкостей охолодження, тракуються деякими авторами на основі формування метастабільних фазових діаграм, які можна отримати шляхом екстраполяції ліній фазової рівноваги в області переохолодженого стану. **Мета статті** – проаналізувати результати металографічного і рентгенофазового аналізів первинного і гранульованого висококремнистого силуміну Альрезист в рамках уявлень формування метастабільних фазових діаграм на основі потрійної діаграми. **Основна частина.** Аналіз наукових публікацій показує, що для подвійних сплавів з евтектичною і перитектичною рівновагою за швидкостей охолодження  $10^3 \dots 10^5$  °/с аномально пересичені тверді розчини з боку алюмінію є метастабільними. Вони кристалізуються відповідно до метастабільних фазових діаграм. Показано, що аномально пересичені метастабільні тверді розчини алюмінію спостерігаються для бінарних систем із проміжними сполуками. Проаналізовано результати мікроструктурного і фазового аналізу гранульованого складнолегованого силуміну на основі потрійної фазової діаграми Al – Si – Fe. **Висновки.** Показано, що під час кристалізації гранул пригнічується виділення з розплаву проміжних інтерметалідів і значно збільшується об'ємна частка  $\alpha$ -Al твердого розчину в структурі сплаву. Отримані дані підтверджують правомірність екстраполяції поверхні ліквідус в область переохолодження у разі придушення кристалізації проміжних фаз у трикомпонентній системі Al – Si – Fe. Розглянуто схему формування метастабільної діаграми на основі трикомпонентної системи Al – Si – Fe з утворенням аномально пересиченого метастабільного твердого розчину алюмінію.

**Ключові слова:** сплави на основі алюмінію; метастабільна кристалізація; метастабільна фазова діаграма; аномально пересичений твердий розчин; аналіз фазового складу

## EFFECT OF COOLING RATE IN CASE OF CRYSTALLIZATION ON PHASE COMPOSITION AND STRUCTURE OF WEARPROOF HYPEREUTECTIC ALUMINUM-SILICON ALLOY ALREZIST

ROMANOVA N.S.<sup>1\*</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Ass. Prof.*,  
IONOVA L.Yu.<sup>2</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Ass. Prof.*

<sup>1\*</sup> Materials Science Department, National metallurgical academy of Ukraine, 4, Gagarina ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (097) 523-52-58, e-mail: [rnsrns@i.ua](mailto:rnsrns@i.ua), ORCID ID: 0000-0002-3211-8009c

<sup>2</sup> Materials Science Department, National metallurgical academy of Ukraine, 4, Gagarina ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 745-31-56, e-mail: [nmetau@metal.nmetau.edu.ua](mailto:nmetau@metal.nmetau.edu.ua), ORCID ID: 0000-0002-8763-0771

**Abstract. Statement of a problem.** The research of logic of formation of structural and phase composition of the alloyed alloys on the basis of Al crystallized with cooling in range  $10^3 \dots 10^5$  °/sec, allows to change properties of these alloys in quite wide limits. Results of researches of the binary alloys of aluminum obtained at crystallization in the specified range of cooling are treated by a number of authors on the basis of formation of metastable phase diagrams. These diagrams can be obtained by extrapolation of phase equilibrium lines to regions of the overcooled state. **Research objective.** To analyzed results of researches of metallographic data and data of X-ray analyses from patterns with different velocity of cooling at crystallization. **Description of obtained results.** In article are investigated experimental silumin containing 35 % Si and alloying elements Fe, Ti, Zr. The phase-structural composition of high-siliceous hypereutectic silumin was considered in according with formation of metastable phase diagram on the basis of Al – Si – Fe system. The analysis of scientific publications showed, that at velocity of cooling in range  $10^3 \dots 10^5$  °/sec, double alloys with the eutectic or peritectic equilibrium and intermediate phases can be crystallized with forming in structure of the supersaturated solid solution on the base of aluminum in according with metastable diagram. Results of the microstructural and phase analysis of the granulated and cast alloy are analyzed on the basis of the triple phase diagram Al – Si – Fe. It is shown that in case of crystallization of granules, were suppressed such intermediated phases as  $\text{FeSi}_2\text{Al}_4$  and  $\text{FeSiAl}_5$  with forming supersaturated  $\alpha$ -Al solid solution. **Conclusions.** Data of an experiment confirm a possibility of extrapolation of a surface a liquidus to area of overcooling in case of suppression of crystallization of the intermediate phases according to the diagram Al – Si – Fe. In article the charting of formation of the metastable diagram on the basis of the stable Al – Si – Fe diagram with formation of abnormally supersaturated solid solution of aluminum and multiphase eutectic is considered.

**Keywords:** alloys on the basis of aluminum; metastable crystallization; metastable phase diagram; abnormally supersaturated solid solution; analysis of phase composition

### Постановка проблеми

Влияние скорости охлаждения на структурно-фазовый состав сплава Альрезист рассматривается в рамках представлений о метастабильной кристаллизации. Эти представления развиты в работах таких исследователей как И. В. Салли,

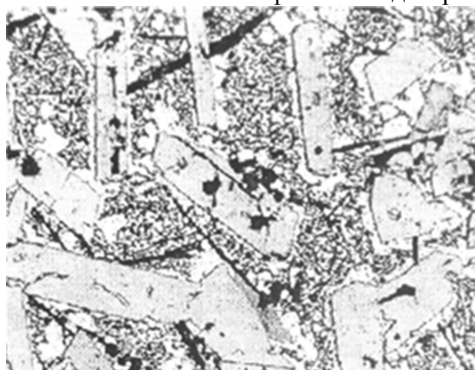
И. С. Мирошниченко, В. И. Добаткина, В. И. Елагина и др.

И. В. Салли и И. С. Мирошниченко показали на примерах двойных сплавов на основе алюминия, что при закалке из жидкого состояния аномально пересыщенные твердые растворы являются метастабильными твердыми растворами, которые кристаллизуются в соответствии с метастабильными фазовыми диаграммами.

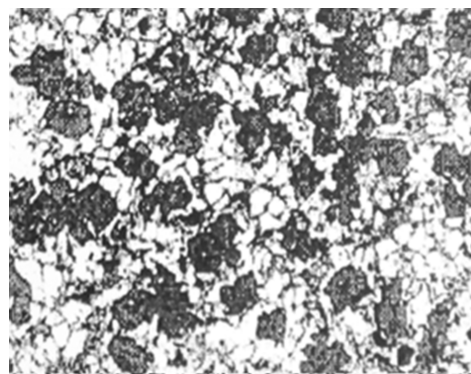
Ими установлено, что для двойных сплавов с эвтектическим и перитектическим равновесием со стороны алюминия и при скоростях охлаждения до  $10^6$  град/с можно получить аномально пересыщенные твердые растворы в том случае, если стабильная фазовая диаграмма имеет промежуточное соединение и кристаллизация этой фазы подавлена. То есть двойные сплавы с промежуточными фазами склонны к образованию аномально пересыщенных твердых растворов. Эти выводы подтверждены на бинарных системах Al с Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Ni, Zr, V, Ti, Mo, W и Co соответственно [1; 2; 6–9]. В этих работах показано, что составы аномально пересыщенных алюминиевых твердых растворов соответствуют точкам, лежащим на линиях фазовых равновесий, экстраполированных в переохлажденную область.

Правомерность экстраполяции линий ликвидуса и солидуса стабильной фазовой диаграммы в области переохлаждения находится в соответствии с принципом непрерывности Н. С. Курнакова. Согласно этому принципу свойства отдельных фаз изменяются непрерывно (монотонно, без разрывов и перегибов), если при переходе через точку фазового равновесия не возникает новых фаз [2]. Иными словами, если охлаждение вести из двухфазной твердо-жидкой области эвтектического сплава и при переходе через линию эвтектического равновесия не образуется новой фазы, по тем или иным причинам, то зависимость растворимости в этих фазах второго компонента от температуры не претерпевает разрывов (скачкообразно не меняется).

Растворимость второго компонента в фазах продолжает непрерывно изменяться, сохраняя ту же тенденцию, что и при температурах выше температуры эвтектического превращения, т. е. по линиям ликвидус и солидус, экстраполированным в область переохлаждения. Экстраполирование линий ликвидуса и солидуса стабильной фазовой диаграммы в переохлажденную область приводит к построению метастабильных фазовых диаграмм.



a



б (b)

Рис. 1. Микроструктура сплава Альрезист:  
a – первичный сплав,  $\times 100$ ; б – гранулированный сплав,  $\times 200$  / Fig. 1. Microstructure Alrezist alloy:  
a – primery alloy,  $\times 100$ ; b – granulated alloy,  $\times 200$

Фазовый состав первичного сплава позволяет предположить, что кристаллизация его идет в соответствии с тройной диаграммой Al – Si – Fe.

Следует отметить, что идеи правомерности экстраполяции линий фазовых диаграмм активно рассматривал в своей докторской диссертации К. П. Бунин – основатель Днепропетровской металлографической научной школы К. П. Бунина – Ю. Н. Тарана.

В монографии Мирошниченко И. С. [2] дано подробное обоснование основных положений графического построения метастабильных фазовых диаграмм при высокоскоростной кристаллизации двойных сплавов с промежуточными фазами. Переход к метастабильной фазовой диаграмме позволяет объяснить изменения в структурно-фазовом составе и количественном соотношении фаз для быстрозакристаллизованных сплавов.

**Цель работы** – проанализировать результаты металлографического и рентгенофазового анализов первичного и гранулированного высококремнистого силумина Альрезист в рамках представлений формирования метастабильных фазовых диаграмм на основе тройной системы Al – Si – Fe.

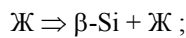
### Результаты и обсуждение

Результаты рентгенофазового и микроструктурного анализов первичного и гранулированного сплава Альрезист изложены в [11; 12]. Эти данные подтверждают правомерность описанного выше подхода, но уже к анализу многокомпонентной системы. Гранулированный сплав Альрезист представляет собой заэвтектический высоколегированный силумин с содержанием Si до 35 % и легирующей композиции из переходных металлов Fe, Ti, Zr. Сплав разрабатывался для производства износостойких тяжело нагруженных дизельных поршней. Микроструктура первичного и гранулированного сплава Альрезист представлена на рисунке 1.

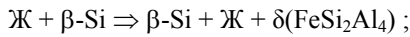
На рисунке 2 изображен алюминиевый угол стабильной фазовой диаграммы Al – Si – Fe [1].

Состав сплава Альрезист описывается в концентрационном треугольнике Al – Si – Fe фигуративной точкой 1. Характер поверхности ликвидус в области 20 % Si и 2 % Fe, наклон и расположение тальвега 2–1, а также последние данные по исследованию этой фазовой диаграммы позволяют предположить тот же фазовый состав в области 35...40 % Si и 2 % Fe, что и в области 20 % Si и 2 % Fe. Согласно этой диаграмме фазовый состав сплава Альрезист должен состоять из кристаллов первичного β-Si, α-Al твердых растворов, интерметаллидов FeSi<sub>2</sub>Al<sub>4</sub> (δ-фаза), FeSiAl<sub>5</sub> (β-фаза), FeSiAl<sub>8</sub> (α-фаза), а кристаллизация проходить в следующей последовательности:

1) из расплава выделяются кристаллы первичного кремния, состав расплава при этом изменяется по линии 1–Б, т. е.

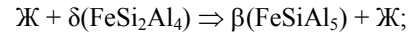


2) при температуре перитектического превращения из расплава выделяется тройная δ-фаза (FeSi<sub>2</sub>Al<sub>4</sub>):



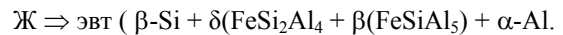
состав расплава в дальнейшем по мере охлаждения и выделения δ(FeSi<sub>2</sub>Al<sub>4</sub>) изменяется в соответствии с тальвегом 2–Б;

3) при температуре, соответствующей фигуративной точке 2, из расплава выделяются интерметаллиды α-фазы (FeSiAl<sub>5</sub>):



состав расплава в дальнейшем меняется по линии 2–3;

4) при температуре, соответствующей фигуративной точке 3, кристаллизация заканчивается с образованием многофазной эвтектики:



Учитывая тот факт, что в алюминиевых сплавах, как правило, перитектические реакции не проходят до конца, фазовый состав в большинстве своем после кристаллизации является неравновесным. В силу довольно ярко выраженной неравновесности процессов кристаллизации в алюминиевых сплавах, в них вполне возможно одновременное присутствие всех перечисленных интерметаллидов FeSi<sub>2</sub>Al<sub>4</sub> (δ-фаза), FeSiAl<sub>5</sub> (β-фаза), FeSiAl<sub>8</sub> (α-фаза), а также присутствие фазы FeAl<sub>3</sub>[10].

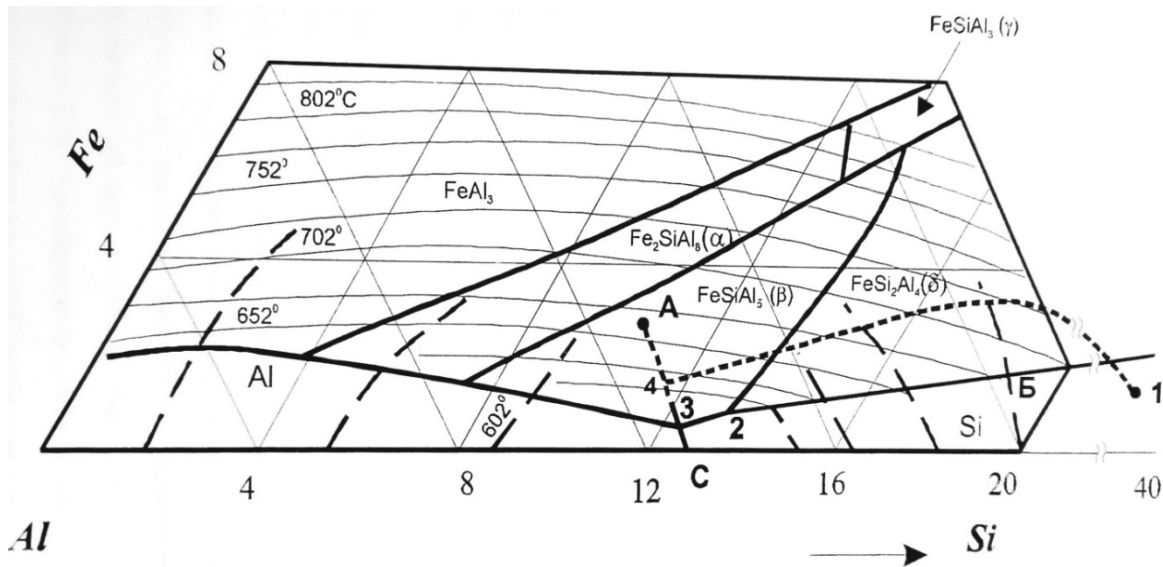


Рис. 2. Алюминиевый угол стабильной фазовой диаграммы Al – Si – Fe [1] /  
Fig. 2. Aluminum angle of the stable phase diagram Al – Si – Fe [1]

Отсутствие в структуре гранулированного сплава первичных кристаллов δ(FeSi<sub>2</sub>Al<sub>4</sub>) и β(FeSiAl<sub>5</sub>)-фаз, а также резкое увеличение объемной доли α-Al твердого раствора (рис. 1), связано с тем, что кристаллизация гранул идет в соответствии с линиями метастабильной фазовой диаграммы. Эта метастабильная диаграмма получается путем экстраполяции поверхности ликвидуса в область переохлаждения, в соответствии с которой происходит кристаллизация метастабильных первичных кристаллов β-Si. Расширение области существования α-Al твердого раствора возможно в тройной фазовой диаграмме при подавлении высокой

скоростью охлаждения кристаллизации промежуточных δ(FeSi<sub>2</sub>Al<sub>4</sub>) и β(FeSiAl<sub>5</sub>) интерметаллидов.

Металлографический анализ гранул не выявил присутствия в микроструктуре этих интерметаллидов, однако на рентгенограмме гранул обнаруживаются слабые линии этих фаз с интенсивностью не более 6...8 %. Это дает основание считать, что указанные интерметаллиды входят в состав метастабильной многофазной эвтектики. На рисунке 2 экстраполяция поверхности ликвидуса, со стороны кремния, изображена с помощью ликвидусных изотерм, которые позволяют

визуализировать поверхность ликвидуса, экстраполированную в область переохлаждения. При подавлении кристаллизации промежуточных  $\delta(\text{FeSi}_2\text{Al}_4)$  и  $\beta(\text{FeSiAl}_5)$ -фаз, поверхности ликвидуса, связанные с выделением первичных кристаллов  $\beta\text{-Si}$  и дендритов  $\alpha\text{-Al}$  твердых растворов (тальвег С–3) экстраполируются в сторону повышения концентрации железа (тальвег С–А).

### Выводы

С помощью полученных геометрических построений на тройной фазовой диаграмме Al – Si – Fe и опираясь на данные по рентгенофазовому и металлографическому исследованиям удается на качественном уровне и не

противоречиво описать процесс кристаллизации гранулированного сплава Альрезист в рамках теории метастабильной кристаллизации. А именно: кристаллизация начинается с выделения первичных кристаллов  $\beta\text{-Si}$ , состав расплава при этом изменяется по линии 1–4; затем выделяются дендриты  $\alpha\text{-Al}$  твердого раствора в соответствии с линией экстраполированного тальвега С–А (участок 4–А) в переохлажденную область и завершается кристаллизация формированием многофазной тонко дифференцированной эвтектики. Увеличение в структуре сплава объемной доли  $\alpha\text{-Al}$  твердого раствора связано с выделением дендритов  $\alpha\text{-Al}$  в соответствии с участком 4–А тальвега С–А.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Мондельфо Л. Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов : монография / Л. Ф. Мондельфо. – Москва : Metallurgia, 1979. – 281 с.
2. Мирошниченко И. С. Закалка из жидкого состояния : монография / И. С. Мирошниченко. – Москва : Metallurgia, 1982. – 268 с.
3. Варич Н. И. Образование фаз в сплавах Al – Cr при закалке из жидкого состояния / Н. И. Варич, Р. Б. Люевич // Известия АН СССР. Металлы. – 1970. – № 4. – С. 82–85.
4. Murray J.L. Stable and metastable phase equilibria in the Al – Mn system / J.L.Murray, A.J.McAlister, R.J.Schaefer and al. // Metallurgical transactions. – Vol. 18A. – 1987. – P. 385.
5. Гранулируемые алюминиевые сплавы : монография / [В. И. Добаткин, В. И. Елагин]. – Москва : Metallurgia, 1981. – 176 с.
6. Мирошниченко И. С. Образование метастабильных фаз и диаграммы метастабильного равновесия / И. С. Мирошниченко // Стабильные и метастабильные фазовые равновесия в металлических системах. – Москва : Наука, 1985. – С. 53–59.
7. Добаткин В. И., Сизова Р. М. / Известия вузов. Цветная металлургия. – № 3. – 1974. – С. 117–120.
8. Kerr H.W. Metastable phase equilibria in Al – Mn / H.W. Kerr, J. Cisse, G.F. Rolling // Acta Met. – 1974. – Vol. 22. – Pp. 677–686.
9. Салли И. В. Некоторые особенности кристаллизации сплавов эвтектического типа при большой скорости охлаждения / И. В. Салли, И. С. Мирошниченко // Доклады АН СССР. – 1960. – Т. 132, № 6. – С. 34–41.
10. Алюминий: свойства и физическое металловедение : справ. изд. / Под ред. Хэтча Дж. Е. – Москва : Metallurgia, 1989. – 422 с.
11. Романова Н. С. Фазовый состав и превращения при нагреве в гранулированных Al – Si-сплавах / Н. С. Романова // Теория и практика металлургии. – № 4. – 1998. – С. 46–50.
12. Романова Н. С. Дослідження структуроутворення силумінів, розробка і освоєння технології виробництва зносостійких дизельних поршнів : автореф. дис. на здобуття вчен. ступ. канд. техн. наук : 05.16.01 / Романова Наталія Сергіївна. – НМетАУ.– Дніпропетровськ, 2001. – 16 с. – Режим доступу: [https://www.google.com.ua/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKewj31NiWyrbSAhVEVxQKHXPDP00QFggaMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.irbis-nbuv.gov.ua%2Fcgi-bin%2Firis\\_nbuv%2Fcgirbis\\_64.exe%3FC21COM%3D2%26I21DBN\\_%3\\_DARD%26P21DBN%3DARD%26Z21ID%3D%26Iimage\\_file\\_name%3DDOC%2F2001%2F01rmszdp.zip%26IMAGE\\_FILE\\_DOWNLOAD%3D1&usq=AFQjCNFoyku7PYh2PTAxvnLdLboCk2Ut9Q](https://www.google.com.ua/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKewj31NiWyrbSAhVEVxQKHXPDP00QFggaMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.irbis-nbuv.gov.ua%2Fcgi-bin%2Firis_nbuv%2Fcgirbis_64.exe%3FC21COM%3D2%26I21DBN_%3_DARD%26P21DBN%3DARD%26Z21ID%3D%26Iimage_file_name%3DDOC%2F2001%2F01rmszdp.zip%26IMAGE_FILE_DOWNLOAD%3D1&usq=AFQjCNFoyku7PYh2PTAxvnLdLboCk2Ut9Q)
13. Baricco M. Metastable phases and phase diagrams / M. Baricco, M. Palumbo, D. Baldissin, E. Bosco, L. Battezzati // La Metallurgia Italiana, 2004. - № 11–12. – Pp. 1-8. – Режим доступа: <http://www.fracturae.com/index.php/aim/article/view/834/793>

### REFERENCES

1. Mondelfo L.F. *Struktura i svoistva alminievyh splavov* [Structure and properties of aluminium alloys]. Moscow : Metallurgiya, 1979, 281p. (in Russian)
2. Miroshnichenko I.S. *Zakalka iz zhidkogo sostoyaniya* [Hardening from liquid state]. Moscow : Metallurgiya, 1982, 268 p. (in Russian)
3. Varich N.I. and Luevich R.B. *Obrazovanie faz v splavah A – Cr pri zakalke iz zhidkogo sostoyaniya* [Formation of phases in Al – Cr alloys at hardening from liquid state]. *Izvestiya AN SSSR. Metally* [Izvestiya AS USSR]. 1970, no. 4, pp. 82–85. (in Russian)
4. Murray J.L., McAlister A.J., Schaefer R.J. and al. Stable and metastable phase equilibria in the Al – Mn system. *Metallurgical transactions*, vol. 18A, 1987, p. 385.
5. Dobatkin V.I. and Elagin V.I. *Granulirovannyye aluminievye splavy* [Granulated aluminum alloys]. Moscow : Metallurgiya, 1981, 176 p. (in Russian)
6. Mirishnichenko I.S. *Obrazovanie metastabilnyh faz i diagrammy metastabilnogo ravnovesiya* [Formation of metastable phases and diagrams of metastable equilibrium]. *Stabilnye i metastabilnye fazovyye ravnovesiya v metallicheskih sistemah* [Stable and metastable phase equilibrium in metallic systems]. Moscow : Nauka, 1985, pp. 53–59. (in Russian)

7. Dobatkin V.I. and Sizova R.M. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya* [Izvestiya vuzov. Non-ferrous metallurgy]. 1974, no. 3, pp. 117–120. (in Russian)
8. Kerr H.W., Cisse J. and Rolling G.F. Metastable phase equilibria in Al – Mn. *Acta Met.*, 1974, vol. 22, pp. 677–686.
9. Salli I.V. and Miroshnichenko I.S. *Nekotorye osobennosti kristallizatsii splavov evtekticheskogo tipa pri bolshih skorostyah ohlazhdeniya* [Some features of the crystallization of eutectic alloys at rapid cooling]. *Doklady AN USSR* [Reports of the USSR Academy of Sciences]. 1960, vol. 132, no. 6, pp. 34–41.
10. *Aluminii : svoysta i fizicheskoe metallovedenie* [Aluminum : properties and physical metallurgical science]. Reference manual. By edited Hetcha Dzh. E. Moscow : Metallurgiya, 1989, 422 p. (in Russian)
11. Romanova N.S. *Fazoviyi sostav i prevrashcheniya pri nagreve v granuliovannyh Al - Si splavah* [Phase composition and transformations at heating in the granulated alloys by Al – Si]. *Teoriya i praktika metallurgii* [Theory and practice of metallurgy]. 1998, no. 4, pp. 46–50. (in Russian)
12. Romanova N.S. *Doslidzhenya strukturoutvoenya syluminiv, rozrobka I osvoennya tehnologii vyrobnyzhtva znosostiikyh dyzelnyh porshniv : avtoreferat dys. na zdobuttya vchenogo stupenya kand. tekhn. nauk :05.16.01* [Research of structurization of silumin, development and mastering of the production technology of wearproof diesel pistons : abstract. dis. on competition of a scientific degree Cand. Tech. Sciences : 05.16.01]. 2001, NMetAU, Dnipropetrovsk, 16 p. (in Ukrainian)
14. M. Baricco, M. Palumbo, D. Baldissin, E. Bosco and L. Battezzati. Metastable phases and phase diagrams. *La Metallurgia Italiana*, 2004, no. 11-12, pp. 1-8.

*Статья рекомендована к публикации д-ром техн. наук, проф. В. И. Мазуром (Украина), д-ром техн. наук, проф. О. Б. Гириным (Украина).*

Поступила в редколлегию 07.04.2017

Принята в печать 11.04.2017