



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-4-41-46>  
УДК 621.745.35

Поступила 08.06.2022  
Received 08.06.2022

## О МОДИФИЦИРОВАНИИ СИЛУМИНОВ

Е. И. МАРУКОВИЧ, В. Ю. СТЕЦЕНКО, Ассоциация литейщиков и металлургов,  
г. Минск, Беларусь, ул. Я. Коласа, 24. E-mail: stetsenko.52@bk.ru

А. В. СТЕЦЕНКО, Белорусско-Российский университет, г. Могилев, Беларусь, пр. Мира, 43

Показано, что элементарные кристаллические ячейки основных продуктов модифицирования силуминов, алюминия и кремния не соответствуют принципу структурного и размерного соответствия Данкова – Конобеевского. Модифицирующие элементы В, Sr, P существенно повышают поверхностную энергию жидких силуминов, а Zr и Ti на нее практически не влияют. Модифицирование силуминов является наноструктурным процессом. Ti, Zr, B образуют интерметаллиды, которые рафинируют нанокристаллы алюминия от демодифицирующих адсорбированных атомов водорода. Фосфор, атомарно растворяясь в силумине, рафинирует нанокристаллы кремния от адсорбированного кислорода. Na и Sr образуют в жидком силумине эмульсию и коллоид, которые защищают эвтектические микрокристаллы  $\alpha$ - и  $\beta_{Si}$ -фазы от демодифицирующего молекулярного водорода. Все эти процессы увеличивают концентрации центров кристаллизации дендритных микрокристаллов  $\alpha$ -и  $\beta_{Si}$ -фазы, делают их более разветвленными и компактными.

**Ключевые слова.** Модифицирование, силумин, нанокристаллы, адсорбция, рафинирование, кислород, водород, дендриты, алюминий, кремний.

**Для цитирования.** Марукович, Е.И. О модифицировании силуминов / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко, А.В. Стеценко // Литье и металлургия. 2022. № 4. С. 41–46. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-4-41-46>.

## ON MODIFICATION OF SILUMINS

E. I. MARUKOVICH, V. Yu. STETSENKO, Association of Foundrymen and Metallurgist of Belarus,  
Minsk, Belarus, 24, Kolasa str. E-mail: stetsenko.52@bk.ru

A. V. STETSENKO, Belarusian-Russian University, Mogilev, Belarus, 43, Mira ave.

It has been shown that the elementary crystal cells of the basic products of modification of silumins, aluminum and silicon do not correspond to the principle of structural and dimensional correspondence of Dankov – Konobeevsky. Modifying elements B, Sr, P significantly increase the surface energy of liquid silumins, and Zr and Ti practically do not affect it. Modification of silumins is a nanostructured process. Ti, Zr, B form intermetallides that refine aluminum nanocrystals from demodifying adsorbed hydrogen atoms. Phosphorus, atomically dissolving in silumin, refiners silicon nanocrystals from adsorbed oxygen. Na and Sr form an emulsion and colloid in liquid silumin, which protect eutectic microcrystals of  $\alpha$ - and  $\beta_{Si}$ -phases from demodifying molecular hydrogen. All these processes increase the concentration of crystallization centers of dendritic microcrystals  $\alpha$ - and  $\beta_{Si}$ -phase, make them more branched and compact.

**Keywords.** Modification, silumin, nanocrystals, adsorption, refining, oxygen, hydrogen, dendrites, aluminum, silicon.

**For citation.** Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V. On modification of silumins. Foundry production and metallurgy, 2022, no. 4, pp. 41–46. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-4-41-46>.

Основными модификаторами силуминов являются Ti, Zr, B, Na, Sr, P и сплавы, содержащие эти элементы. Принято считать, что они служат поверхностно-активными элементами (ПАЭ) или образуют центры кристаллизации (ЦК), которыми являются интерметаллиды [1, 2].

Экспериментально установлено, что B, Sr, P существенно повышают поверхностную энергию жидких силуминов, Zr и Ti практически на нее не влияют [3, 4]. Поэтому эти элементы не могут быть ПАЭ при кристаллизации силуминов. Чтобы интерметаллиды, содержащие Ti, Zr, B, Na, Sr, P, были ЦК микрокристаллов  $\alpha$ -фазы (Al) и  $\beta_{Si}$ -фазы (Si), их элементарные кристаллические решетки должны удовлетворять принципу структурного и размерного соответствия Данкова – Конобеевского [5]. Согласно этому принципу, подложка может стать ЦК фазы, если они имеют однотипные элементарные кристаллические решетки, а их периоды отличаются не более чем на 8% [6].

Алюминий и кремний имеют кубические элементарные кристаллические решетки [7]. Параметры элементарных кристаллических решеток основных интерметаллидов модифицирования силуминов представлены в таблице. В ней периоды элементарных кристаллических решеток интерметаллидов

обозначены символом  $a$ , а периоды элементарных кристаллических решеток алюминия и кремния – соответственно  $a_A$  и  $a_K$ .

Параметры элементарных кристаллических решеток алюминия, кремния и основных интерметаллидов модифицирования силуминов [7, 8]

Фазы	Тип элементарной кристаллической решетки	$a$ , нм	$\frac{\Delta a}{a_A}$ , %	$\frac{\Delta a}{a_K}$ , %
Al	Кубическая	0,405	–	–
Si	Кубическая	0,543	–	–
TiAl <sub>3</sub>	Тетрагональная	0,384	5	29
ZrAl <sub>3</sub>	Тетрагональная	0,401	1	26
AlB <sub>2</sub>	Гексагональная	0,300	26	45
TiB <sub>2</sub>	Гексагональная	0,302	25	44
ZrB <sub>2</sub>	Гексагональная	0,315	21	42
TiSi <sub>2</sub>	Ромбическая	0,825	104	52
ZrSi <sub>2</sub>	Ромбическая	0,372	8	32
NaSi <sub>2</sub>	Тетрагональная	0,498	23	8
NaAlSi <sub>4</sub>	Кубическая	0,738	82	34
SrSi <sub>2</sub>	Кубическая	0,654	62	20
SrAl <sub>4</sub>	Тетрагональная	0,446	10	18
B <sub>3</sub> Si	Тетрагональная	0,446	10	18
AlP	Кубическая	0,542	34	0,2

Из таблицы следует, что только элементарные кристаллические решетки AlP и Si соответствуют принципу структурного и размерного соответствия Данкова – Конобеевского. Но известно, что при модифицировании заэвтектического силумина лигатурой Al – Cu – P при оптимальной концентрации фосфора 0,01–0,04% в расплаве интерметаллид AlP не образуется [6]. Следовательно, основные интерметаллиды модифицирования силуминов не могут быть ЦК микрокристаллов  $\alpha$ -и  $\beta_{Si}$ -фазы при затвердевании силуминов.

Исходя из изложенного выше, возникает вопрос: какова роль Ti, Zr, B, Na, Sr и P при модифицировании силуминов? Чтобы ответить на этот вопрос, необходимо исследовать процессы взаимодействия основных модификаторов силуминов с расплавом и при его кристаллизации.

В эвтектическом силумине содержится 12 ат. % кремния [9]. В таком, но жидком силумине находятся 86 ат. % элементарных нанокристаллов алюминия ( $Al_{эн}$ ) и 11 ат. % элементарных нанокристаллов кремния [10]. Поэтому расплав силумина в основном состоит из  $Al_{эн}$  и  $Si_{эн}$ .

Установлено, что при 973 К увеличение в алюминии концентрации кремния с 1 до 11% приводит к возрастанию в сплаве содержания  $Al_2O_3$  с 0,0012 до 0,023% и повышению в расплаве концентрации водорода с 1,2 до 1,48 см<sup>3</sup>/100 г [11]. Это означает, что кремний в жидком алюминии в основном увеличивает содержание кислорода, который поступает в расплав из атмосферного воздуха. Это происходит благодаря диссоциации молекул кислорода и адсорбции его атомов на элементарных нанокристаллах кремния. Для диссоциации (атомизации) молекул кислорода необходима стандартная теплота, равная 500 кДж/моль, т. е. 250 кДж/моль на атомарный кислород [12]. Но стандартная теплота его адсорбции на  $Si_{эн}$  составляет 880 кДж/моль, что также превышает стандартную теплоту адсорбции атомов кислорода на  $Al_{эн}$ , которая равна 838 кДж/моль [13]. Поэтому атомы кислорода преимущественно будут адсорбироваться на элементарных нанокристаллах кремния, понижая поверхностную энергию расплавов силуминов. Она значительно ниже, чем у жидкого алюминия [3].

Алюминий может взаимодействовать с адсорбированными атомами кислорода по следующей реакции:



где  $\{O\}_K$  – атомы кислорода, адсорбированные на элементарных нанокристаллах кремния.

Стандартная энтальпия этой реакции ( $\Delta H_1$ ) будет определяться уравнением Гесса [14]:

$$\Delta H_1 = \Delta H(Al_2O_3) - 2\Delta H(Al) - 3\Delta H(\{O\}_K), \quad (2)$$

где  $\Delta H(Al_2O_3)$ ,  $\Delta H(Al)$  – стандартные энтальпии образования  $Al_2O_3$  и Al;  $\Delta H(\{O\}_K)$  – стандартная энтальпия адсорбции атомов кислорода на  $Si_{эн}$ .

$\Delta H(Al_2O_3) = -1676$  кДж/моль [15].  $\Delta H(Al) = 0$  [14].  $\Delta H(\{O\}_K) = -880$  кДж/моль [13]. Подставляя численные значения стандартных энтальпий в уравнение (2), получаем:  $\Delta H_1 = 964$  кДж/моль.  $\Delta H_1 > 0$ ,

поэтому элементарные нанокристаллы алюминия не будут взаимодействовать с адсорбированными атомами кислорода.

Кремний может реагировать с адсорбированными атомами кислорода по следующей реакции:



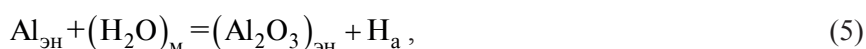
Стандартная энтальпия этой реакции ( $\Delta H_2$ ) будет определяться уравнением Гесса [14]:

$$\Delta H_2 = \Delta H(\text{SiO}_2) - \Delta H(\text{Si}) - 2\Delta H(\{\text{O}\}_k), \quad (4)$$

где  $\Delta H(\text{SiO}_2)$  и  $\Delta H(\text{Si})$  – стандартные энтальпии образования  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Si}$ .

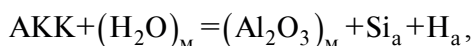
$\Delta H(\text{SiO}_2) = -880$  кДж/моль [15].  $\Delta H(\text{Si}) = 0$  [14].  $\Delta H(\{\text{O}\}_k) = -880$  кДж/моль [13]. Подставляя численные значения стандартных энтальпий в уравнение (4), получаем:  $\Delta H_2 = 880$  кДж/моль.  $\Delta H_2 > 0$ , поэтому элементарные нанокристаллы кремния не будут взаимодействовать с адсорбированными на них атомами кислорода. Следовательно, они будут термодинамически устойчивы в расплаве силуминов.

Жидкий силумин активно реагирует с атмосферным воздухом, содержащим пары (молекулы) воды. Они взаимодействуют с  $\text{Al}_{\text{эн}}$  с образованием атомарного водорода по следующей реакции:



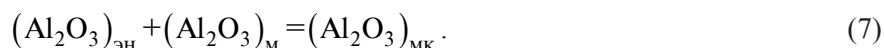
где  $(\text{H}_2\text{O})_{\text{м}}$  – молекулы воды;  $(\text{Al}_2\text{O}_3)_{\text{эн}}$  – элементарные нанокристаллы оксида алюминия;  $\text{H}_{\text{а}}$  – атомы водорода.

Кроме  $\text{Al}_{\text{эн}}$  и  $\text{Si}_{\text{эн}}$ , в жидком силумине существуют свободные атомы алюминия ( $\text{Al}_{\text{а}}$ ) и алюминиево-кремниевые комплексы (АКК) на основе  $\text{Al}_2\text{Si}$  [10]. Они также реагируют с молекулами воды по следующим реакциям:



где  $(\text{Al}_2\text{O}_3)_{\text{м}}$  – молекулы оксида алюминия;  $\text{Si}_{\text{а}}$  – свободные атомы кремния.

После (5) и (6) происходит реакция с образованием микрокристаллов оксида алюминия:



Атомарный водород, диффундируя в жидкий силумин, не образует гидридов, но будет адсорбироваться на  $\text{Al}_{\text{эн}}$  и находиться в свободном (растворенном) состоянии. Водород, как ПАЭ, снижает поверхностную энергию расплава.

Стандартная теплота диссоциации (атомизации) молекул атмосферного азота относительно велика и составляет 947 кДж/моль [13]. Поэтому маловероятно, что будет происходить атомизация азота и он в атомарном виде сможет попасть в жидкий силумин. Но с его компонентами азот образует нитриды в виде нанокристаллов и молекул, которые могут встраиваться в формирующиеся микрокристаллы  $\alpha$ -фазы, образуя так называемые «растворы внедрения».

При охлаждении жидкого доэвтектического силумина концентрация растворенного водорода снижается вследствие протекания реакции:



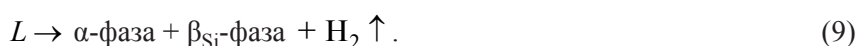
Соответственно будет уменьшаться концентрация адсорбированного водорода, который препятствует объединению нанокристаллов в ЦК первичных микрокристаллов  $\alpha$ -фазы. В результате увеличивается их концентрация и структура отливок доэвтектического силумина становится мелкокристаллической. При этом реакции дегазации и десорбции водорода протекают достаточно медленно. Наибольший эффект достигается при длительном выстаивании силумина вблизи температуры ликвидуса.

В реальных условиях литья охлаждение жидкого силумина происходит достаточно быстро. Поэтому существенно уменьшить концентрации растворенного и адсорбированного водорода до начала затвердевания не удается. В результате в процессе первичной кристаллизации участвует небольшое количество ЦК  $\alpha$ -фазы. Это приводит к укрупнению первичных микрокристаллов (зерен)  $\alpha$ -фазы доэвтектического силумина. Поэтому для модифицирования его первичной структуры в перегретый до определенной температуры расплав добавляют лигатуры  $\text{Al} - \text{Ti}$ ,  $\text{Al} - \text{Zr}$ ,  $\text{Al} - \text{Ti} - \text{B}$ . В них содержатся интерметаллиды:  $\text{TiAl}_3$ ,  $\text{ZrAl}_3$ ,  $\text{TiB}_2$ . Их модифицирующее действие объясняется большой способностью поглощать и адсорбировать водород [16]. Именно он является основным демодифицирующим элементом для первичных микрокристаллов (зерен)  $\alpha$ -фазы. Это подтверждается тем, что при пропускании через жидкий доэвтектический

силумин АК9 постоянного электрического тока концентрация водорода в расплаве уменьшалась с 1,5 до 0,2 см<sup>3</sup>/100 г, что приводило к модифицированию (измельчению) зеренной структуры сплава [17].

Газопоглощающая эффективность модифицирующих интерметаллидов, содержащих Ti, Zr и В, будет пропорциональна их дисперсности. Интерметаллиды TiB<sub>2</sub> более дисперсны, чем TiAl<sub>3</sub>, поэтому модифицирующая лигатура Al – Ti – В более эффективна, чем Al – Ti, что подтверждается экспериментально и на практике модифицирования доэвтектического силумина [1, 18]. Таким образом, модифицирующее действие интерметаллидов TiAl<sub>3</sub>, ZrAl<sub>3</sub>, TiB<sub>2</sub> сводится к снижению концентрации адсорбированного водорода, который препятствует образованию ЦК первичных микрокристаллов α-фазы при кристаллизации доэвтектического силумина.

При кристаллизации эвтектического силумина происходит газозэвтектическая реакция, связанная со значительным выделением молекулярного водорода:



Это приводит к тому, что при кристаллизации эвтектики на ее межфазных границах непрерывно зарождаются, растут и удаляются пузырьки молекулярного водорода. Этот процесс тормозит образование, рост и разветвление дендритных микрокристаллов эвтектики. В результате она становится немодифицированной.

Основными модификаторами силуминовой эвтектики являются натрий- и стронцийсодержащие флюсы. При их взаимодействии с расплавом силумина происходит восстановление металлических Na и Sr. Они атомарно не растворяются в жидком силумине, но диспергируются в нем, имея относительно низкую межфазную поверхностную энергию. При этом натрий образует эмульсию, а стронций – коллоид. Это подтверждается тем, что после растворения натрийсодержащего флюса в жидком эвтектическом силумине его вязкость возрастает примерно в 15 раз [19]. Если силуминовый расплав с натриевой эмульсией подвергнуть фильтрации, то исчезает модифицирующий эффект при кристаллизации эвтектики [20].

Чтобы значительно уменьшить выделение молекулярного водорода при газозэвтектической реакции на микрокристаллах α- и β<sub>Si</sub>-фазы, необходимо создать для этого дополнительные подложки. Ими являются натриевая эмульсия и стронциевый коллоид. На их жидких и твердых микрочастицах не только адсорбируются атомы водорода, но и происходит образование и удаление пузырьков молекулярного водорода при газозэвтектической реакции. Это подтверждается тем, что Na и Sr увеличивают количество пор в отливках силумина [20]. Таким образом, натрий и стронций способствуют дегазации расплава силумина при газозэвтектической реакции, существенно ускоряя процесс формирования и разветвления дендритных микрокристаллов α- и β<sub>Si</sub>-фазы при эвтектической кристаллизации силумина. Это приводит к модифицированию эвтектики отливок.

Фосфор является самым эффективным модифицирующим элементом для первичных микрокристаллов заэвтектического силумина. Поверхностная энергия его расплава существенно повышается, если в него добавить фосфорсодержащую лигатуру [4]. Это происходит потому, что фосфор в жидком заэвтектическом силумине вступает в реакцию с адсорбированным кислородом, связывая его в газообразный оксид. Высокая реакционная способность фосфора объясняется его большим сродством к кислороду и атомарным состоянием в расплаве.

При модифицирующей обработке жидкого заэвтектического силумина фосфорсодержащей лигатурой атомы фосфора рафинируют нанокристаллы кремния от адсорбированного кислорода. Это интенсифицирует процесс кристаллизации первичных микрокристаллов β<sub>Si</sub>-фазы, повышается концентрация их ЦК. Известно, что эти микрокристаллы формируются в виде пластинчатых дендритов [5, 21]. На степень их компактности большое влияние будут оказывать ПАЭ и интенсивность теплоотвода. Связывая такой активный ПАЭ, как адсорбированный кислород, фосфор увеличивает компактность дендритов β<sub>Si</sub>-фазы при первичной кристаллизации заэвтектического силумина. Рафинирующее действие атомарного фосфора экспериментально подтверждается тем, что в модифицированных первичных кристаллах β<sub>Si</sub>-фазы содержание кислорода значительно ниже, чем в немодифицированных [21].

Повышенная интенсивность теплоотвода увеличивает скорость затвердевания отливок. Она уменьшает демодифицирующее действие адсорбированного кислорода, повышает концентрацию ЦК первичных микрокристаллов β<sub>Si</sub>-фазы, делая их более мелкими и компактными. Они получают при использовании фосфора, который является самым сильным модифицирующим элементом при первичной кристаллизации заэвтектического силумина.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Никитин В.И., Никитин К.В. Наследственность в литых сплавах. М.: Машиностроение-1, 2005. 476 с.
2. Бродова И.Г., Попель П.С., Барбин Н.М. и др. Исходные расплавы как основа формирования структуры и свойств алюминиевых сплавов. Екатеринбург: УРО РАН, 2005. 370 с.
3. Ефименко В.П., Баранов А.А., Кисунько В.З. и др. О модифицирующем влиянии некоторых добавок на кристаллизацию силумина // Изв. выс. учеб. завед. Цветная металлургия. 1982. № 6. С. 86–89.
4. Кимстач Г.М., Муховецкий Ю.П., Борщов В.Д. и др. Исследование процессов модифицирования Al-Si сплавов // Металловедение и термическая обработка металлов. 1984. № 8. С. 57–59.
5. Марукович Е.И., Стеценко В.Ю. Модифицирование сплавов. Минск: Беларуская навука, 2009. 192 с.
6. Стеценко В.Ю. Теоретические и технологические основы получения заготовок повышенной износостойкости из силуминов с высокодисперсной инвертированной структурой: автореф. дис. ... д-ра. техн. наук. Минск, 2021. 60 с.
7. Справочник химика. Т. 1. Л.: Химия, 1971. 1072 с.
8. Самсонов Г.В., Винницкий И.М. Тугоплавкие соединения: справ. М.: Металлургия, 1976. 560 с.
9. Строганов Г.Б., Ротенберг В.А., Гершман Г.Б. Сплавы алюминия с кремнием. М.: Металлургия, 1977. 272 с.
10. Марукович Е.И., Стеценко В.Ю., Стеценко А.В. Наноструктурная кристаллизация силуминов // Литье и металлургия. 2022. № 1. С. 40–42.
11. Макаров Г.С. Рафинирование алюминиевых сплавов газами. М.: Металлургия, 1983. 120 с.
12. Свойства элементов. Ч. 1. Физические свойства: справ. / Под ред. Г.В. Самсонова. М.: Металлургия, 1976. 600 с.
13. Константы взаимодействия металлов с газами: справ. / Под ред. Б.А. Колачева и Ю.В. Левинского. М.: Металлургия, 1987. 368 с.
14. Жуховицкий А.А., Шварцман Л.А. Физическая химия. М.: Металлургия, 1987. 688 с.
15. Голубцов В.А., Лунев В.В. Модифицирование стали для отливок и слитков. Челябинск – Запорожье: ЗНТУ, 2009. 356 с.
16. Добаткин В.И., Габидуллин Р.М., Колачев Б.А. и др. Газы и окислы в алюминиевых формируемых сплавах. М.: Металлургия, 1976. 264 с.
17. Килин А.Б. Влияние электрического тока на дегазацию и модифицирование алюминиевых сплавов // Литейное производство. 2002. № 8. С. 21–22.
18. Напалков В.И., Махов С.В., Поздняков А.В. Модифицирование алюминиевых сплавов. М.: Издательский дом МИ-СиС, 2017. 348 с.
19. Боом Е.А. Природа модифицирования сплава типа силумин. М.: Металлургия, 1972. 72 с.
20. Задруцкий С.П., Немененок Б.М., Королев С.П. и др. О рафинировании и модифицировании алюминиевых сплавов // Литейное производство. 2004. № 3. С. 17–22.
21. Бараненко О.А., Кузнецов А.А. Влияние кислорода на форму роста кристаллов твердого раствора на основе кремния // Вест. Донбасской гос. машиностроительной академии. 2007. № 2Е (10). С. 201–204.

## REFERENCES

1. Nikitin V.I., Nikitin K.V. *Nasledstvennost' v lityh splavah* [Heredity in cast alloys]. Moscow, Mashinostroenie-1 Publ., 2005, 476 p.
2. Brodova I.G., Popel' P.S., Barbin N.M. et al. *Iskhodnye rasplavy kak osnova formirovaniya struktury i svoystv alyuminievykh splavov* [Initial melts as the basis for the formation of the structure and properties of aluminum alloys]. Ekaterinburg, URO RAN Publ., 2005, 370 p.
3. Efimenko V.P., Baranov A.A., Kisun'ko V.Z. et al. O modifiziruyushchem vliyaniy nekotorykh dobavok na kristallizaciyu silumina [On the modifying effect of some additives on silumin crystallization]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Cvetnaya metallurgiya = Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Non-Ferrous Metallurgy*, 1982, no. 6, pp. 86–89.
4. Kimstach G.M., Muhoveckij YU.P., Borshchov V.D. et al. Issledovanie processov modifitsirovaniya Al-Si splavov [Study of Al-Si Alloy Modification Processes]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov = Metal Science and Heat Treatment*, 1984, no. 8, pp. 57–59.
5. Marukovich E.I., Stetsenko V.Yu. *Modifitsirovanie splavov* [Modification of alloys]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2009, 192 p.
6. Stetsenko V.Yu. *Teoreticheskie i tekhnologicheskie osnovy polucheniya zagotovok povyshennoj iznosostojkosti iz siluminov s vysokodispersnoy invertirovannoy strukturoj. Avtoref. dis. dokt. tekhn. nauk* [Theoretical and technological bases for production of blanks of increased wear resistance from silumins with highly dispersed inverted structure]. Autoref. diss. Dr. technical sciences. BNTU Publ., Minsk, 2021, 60 p.
7. *Spravochnik himika* [Chemist's Handbook]. Leningrad, Himiya Publ., 1971, vol. 1, 1072 p.
8. Samsonov G.V., Vinnickij I.M. *Tugoplavkie soedineniya (spravochnik)* [Refractory compounds (reference)]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1976, 560 p.
9. Stroganov G.B., Rotenberg V.A., Gershman G.B. *Splavy alyuminiya s kremniem* [Aluminium-silicon alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1977, 272 p.
10. Marukovich E.I., Stetsenko V.Yu., Stetsenko A.V. Nanostrukturnaya kristallizatsiya siluminov [Nanostructured crystallization of silumins]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 1, pp. 40–42.
11. Makarov G.S. *Rafinirovanie alyuminievykh splavov gazami* [Refining of aluminium alloys with gases]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1983, 120 p.
12. *Svoystva elementov. CH. 1. Fizicheskie svoystva: spravochnik* [Properties of elements. Part 1. Physical Properties: Reference]. Pod red. G.V. Samsonova. Moscow, Metallurgiya Publ., 1976, 600 p.
13. *Konstanty vzaimodeystviya metallov s gazami: spravochnik* [Metal-Gas Interaction Constants: Reference]. Pod red. B.A. Kolacheva i YU.V. Levinskogo. Moscow, Metallurgiya Publ., 1987, 368 p.
14. Zhuhovickij A.A., Shvarcman L.A. *Fizicheskaya himiya* [Physical chemistry]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1987, 688 p.

15. **Golubcov V.A., Lunev V.V.** *Modificirovanie stali dlya otlivok i slitkov* [Steel modification for castings and ingots]. Chelyabinsk – Zaporozhye, ZNTU Publ., 2009, 356 p.
16. **Dobatkin V.I., Gabidullin R.M., Kolachev B.A. et al.** *Gazy i oksidy v alyuminievyh formiruemyh splavah* [Gases and oxides in aluminum formed alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1976, 264 p.
17. **Kilin A.B.** Vliyanie elektricheskogo toka na degazaciyu i modificirovanie alyuminievyh splavov [Influence of electric current on degassing and modification of aluminium alloys]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry*, 2002, no. 8, pp. 21–22.
18. **Napalkov V.I., Mahov S.V., Pozdnyakov A.V.** *Modificirovanie alyuminievyh splavov* [Modification of aluminium alloys]. Moscow, Izdatel'skij dom MISiS Publ., 2017, 348 p.
19. **Boom E.A.** *Priroda modificirovaniya splava tipa silumin* [Nature of modification of silumin alloy]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1972, 72 p.
20. **Zadruckij S.P., Nemenenok B.M., Korolev S.P. et al.** O rafinirovanii i modificirovanii alyuminievyh splavov [On Refining and Modification of Aluminum Alloys]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry*, 2004, no. 3, pp. 17–22.
21. **Baranenko O.A., Kuznecov A.A.** Vliyanie kisloroda na formu rosta kristallov tverdogo rastvora na osnove kremniya [Effect of Oxygen on Crystal Growth Form of Silicon-Based Solid Solution]. *Vestnik DGMA = Vestnik DGMA*, 2007, no. 2E (10), pp. 201–204.