



УДК 622.56.001

Поступила 12.10.2015

## МОДИФИЦИРОВАНИЕ ЭВТЕКТИЧЕСКИХ И ПЕРВИЧНЫХ ЧАСТИЦ КРЕМНИЯ В СИЛУМИНАХ. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

## MODIFICATION OF EUTECTIC AND PRIMARY PARTICLES OF SILICON IN SILUMINS. DEVELOPMENT PROSPECTS

*А. Т. ВОЛОЧКО, ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси», г. Минск, Беларусь*

*A. T. VOLOCHKO, Physical and Technical Institute of National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

*Проанализированы основные подходы в модифицировании силуминов. Приведены результаты воздействия различных комплексных модификаторов на структуру и свойства алюминиево-кремниевых сплавов. Рассмотрены перспективы создания силуминов, отличающихся не только прочностными, но и пластическими свойствами.*

*The principal approaches to modification of silumins have been analyzed. Results of the effect of various complex modifying agents on the structure and properties of aluminum-silicon alloys have been presented. Prospects of production of silumins that are different not only in strength properties but also in plastic properties have been analyzed.*

**Ключевые слова.** Силумины, эвтектика, лигатуры, модифицирование, наноразмерные тугоплавкие частицы, направленная кристаллизация, традиционные методы литья.

**Keywords.** Silumins, eutectic point, alloying elements, modification, nanodimensional refractory particles, directed crystallization, conventional methods of casting.

Особую группу конструкционных материалов представляют алюминиевые сплавы, среди которых силумины зарекомендовали себя в качестве наиболее широко используемых в машиностроении.

В зависимости от содержания кремния силумины имеют различную структуру (рис. 1), которая определяет не только эксплуатационные свойства материала, но и возможности обработки давлением, термообработки, а также стойкость инструмента при их механической обработке.

В качестве основных составляющих бинарных силуминов, кристаллизующихся в условиях равновесия, в зависимости от содержания кремния можно выделить:

- для доэвтектических сплавов (содержание кремния до 12,2 ат.%, 11,7 мас.%) это твердый раствор алюминия  $\alpha$ -фаза и эвтектика из кремнийсодержащего  $\alpha$ -твердого раствора;
- для заэвтектических сплавов это практически чистый кремний  $\beta$ -фаза, погруженный в эвтектическую матрицу.

Важнейшими аспектами повышения свойств силуминов являются форма, размер и соотношение эвтектических и первичных частиц кремния, а также исключение дендритной формы кристаллов  $\alpha$ -твердой фазы.

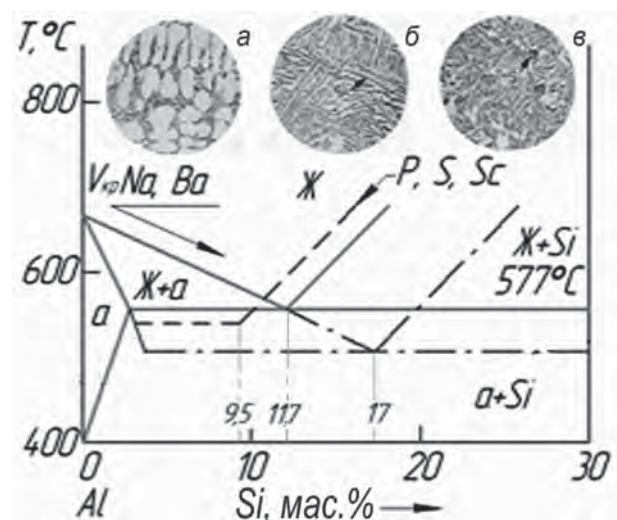


Рис. 1. Фрагменты диаграммы состояния в условиях равновесия (сплошная линия) и типичные структуры доэвтектического (а), эвтектического (б), заэвтектического (в) состояния и возможности сдвига эвтектической точки в условиях модифицирования примесными атомами Ва (штрихпунктирная линия), солями  $\text{NaPO}_3$  (штриховая линия)

Анализ многочисленных факторов, влияющих на свойства силуминов, показывает, что важная роль в формировании качественных отливок принадлежит процессам модифицирования, поскольку изменить структурное состояние кремния другими методами, в том числе последующей термомеханической обработкой, не всегда представляется возможным. Только специальными методами обработки металлов давлением, такими, как поперечно-винтовая прокатка, возможно диспергировать кремний в сплаве [1]. Однако для возможности пластического деформирования силуминов необходимо, чтобы они имели достаточные пластические свойства. Путем введения небольших добавок элементов-модификаторов представляется возможным изменить морфологию и дисперсность кремния как в эвтектике, так и первичных кристаллов и существенно (на 80–100%) повысить уровень пластичности силуминов. Это открывает путь для создания литейно-деформационных технологий формирования свойств и формообразования ответственных изделий машиностроения.

Для развития теории и практики модифицирования, а также разработки новых комплексных модификаторов необходимо получить ответы на следующие вопросы:

- какая роль иницирующего действия отдельных фаз примесных атомов зародышевого действия и какое влияние они оказывают на кристаллизацию других фаз;
- какова роль поверхностно-активных веществ в зоне разделения фаз;
- какая фаза при кристаллизации является ведущей и какая последовательность их образования.

Анализ структурного состояния силуминов, кристаллизующихся в условиях неравновесного состояния, позволяет полагать, что кристаллизация происходит в несколько стадий. Первая начинается с выделения первичного кремния, причем не только в заэвтектических силуминах, но и в эвтектических и при определенных концентрациях в доэвтектических [2]. Вторая стадия связана с тем, что вокруг этих кристаллов образуются зоны жидкости, сильно обедненные кремнием, что создает условия для зарождения так называемых псевдопервичных зерен дендритов  $\alpha$ -твердого раствора. Именно по этой причине при определенных условиях охлаждения и наличии примесей в структуре эвтектических и заэвтектических сплавов появляется нехарактерная дендритная структура  $\alpha$ -фазы, которая приводит к снижению механических свойств и в особенности антифрикционных. На третьей стадии обычно происходит кристаллизация эвтектики.

Следовательно, важнейшей задачей является целенаправленное управление литой структурой и свойствами силуминов при объемной кристаллизации отливок в обычных нестационарных процессах традиционного литья.

Анализ научной литературы и собственные исследования [2–6] применения различных модификаторов для модифицирования первичного кремния показывают, что наиболее эффективны такие элементы, как фосфор, сера, кальций, цезий, лантан и ряд других (рис. 2).

Обработка фосфором в составе медьфосфористых лигатур измельчает кремний  $\beta$ -фазу в 4–10 раз. При этом резко повышается износостойкость. Среди недостатков применения медьфосфористых лигатур можно отметить большую стоимость, значительный перегрев расплава ( $T > 850$  °C), длительность выдержки  $> 20$  мин и укрупнение эвтектической структуры.

Характерная особенность силуминов состоит в том, что в условиях неравновесной кристаллизации при наличии примесей зачастую в эвтектических и заэвтектических сплавах можно выявить доэвтектическую структуру с дендритными зёрнами  $\alpha$ -фазы, что делает продукцию, выпускаемую из этих сплавов,



Рис. 2. Классификация применяемых модификаторов алюминиевых сплавов в зависимости от характера их воздействия на структуру

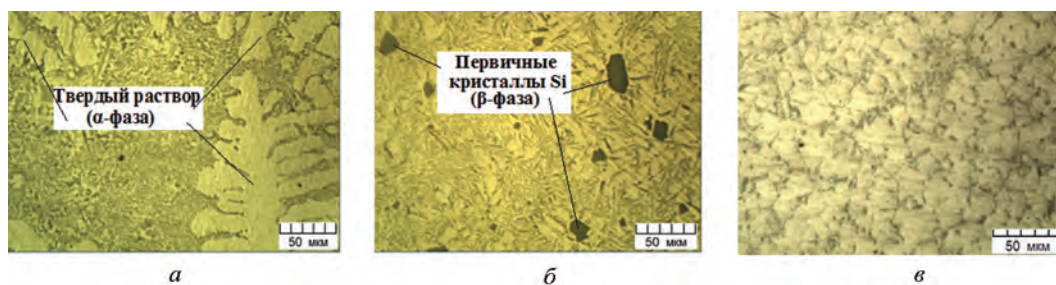


Рис. 3. Микроструктура силуминов, нехарактерная для равновесных условий кристаллизации: *a* – немодифицированного эвтектического сплава АК12М2МгН с дендритами ( $\alpha$ -фаза); *б* – модифицированного доэвтектического сплава АК9 лигатурой с  $\text{NaPO}_3$  с включениями первичного кремния ( $\beta$ -фаза); *в* – заэвтектического силумина АК17 без включений первичного кремния ( $\beta$ -фаза) ( $V_{\text{кр}} = 10^2\text{--}10^3$  град/с)

неконкурентоспособной, не позволяет повысить ресурс работы механизмов машин, достичь высоких эксплуатационных характеристик.

Нехарактерные для равновесной кристаллизации виды структур представлены на рис.3.

Одними из сильных модификаторов дендритов  $\alpha$ -твердого раствора являются титан, бор, которые при попадании в расплав образуют ультрадисперсные интерметаллидные соединения  $\text{AlB}_2$ ,  $\text{TiB}_2$ ,  $\text{TiAl}_3$ ,  $\text{ZrAl}_3$ , являющиеся центрами кристаллизации. В связи с тем что эти элементы имеют высокую температуру плавления, на практике их вводят в расплав или в виде алюминиевых лигатур (типа Al-5 мас.%Ti-1 мас.% В) или в виде комплексных солей типа  $\text{K}_2\text{TiF}_6$ ,  $\text{KBF}_4$ ,  $\text{K}_2\text{ZrF}_6$  [3,8].

Добавки Ti (до 1,7%) или В (до 0,07%) в литейные сплавы системы Al-Si-Cu вызывают измельчение зерна и уменьшение междендритных расстояний [9]. Для более эффективного измельчения зерна оптимальным соотношением Ti/В в тройных лигатурах является соотношение 1/4 при содержании титана в сплаве 0,13 мас.%, а для уменьшения междендритного расстояния соотношение должно быть 2/1 [10].

Важный момент повышения эффективности модифицирующих лигатур – не только химический состав, но и способ получения и последующей их обработки [11–14]. Так, получение лигатур Al–В–Ti в режиме самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) позволяет уменьшить зародышеобразующую фазу [14]. Положительно влияет на модифицирование структуры и последующая пластическая деформация лигатуры [7,12].

В качестве комплексных модификаторов, действующих на дендриты  $\alpha$ -твердого раствора и эвтектику, предлагаются лигатуры систем Al-Sr-Ti-B, Ni-Cr-Al-Ti [15]. Причем использование для их изготовления нанопорошков вместо обычносплавленных лигатур несколько повышает механические свойства.

В последнее время повышенный интерес исследований по поиску модифицирования первичной и кремниевой фазы в эвтектике связан с так называемой концепцией сдвига псевдоэвтектической точки по направлению к компоненту с более высокой точкой плавления Si за счет примесных атомов [6, 16]. Особый интерес представляет Ва.

Так, известно, что элементарный барий образует при температурах  $\sim 870$  °С твердый раствор с  $\sim 0,5$  ат.% концентрацией кремния и не взаимодействует с алюминием. Поэтому полагают, что добавление 1–4 мас.% Ва в расплав силумина, содержащего 14–17 мас.% Si, позволяет получить эвтектическую структуру сплава без первичных выделений кремния [6]. Проведение процесса охлаждения расплава методом направленной кристаллизации привело к получению оригинальной волокнистой структуры кремния размером 10–30 нм по образцу роста снопа пшеницы, расходящегося из точки зарождения (рис. 4). Такие сплавы, обладающие наноразмерными кремниевыми частицами, имеют достаточно высокие механические свойства, предел прочности до 475 МПа при деформации разрушения до 5 %.

При объяснении механизмов появления такой структуры с помощью высокоразрешающей просвечивающей электронной микроскопии ряду исследователей [16] удалось установить, что кремниевые частицы имеют внешнюю поверхность, параллельную внутренней плоскости двойника.

Сдвиг псевдоэвтектической точки и наноразмерность ширины кремниевых волокон подтверждают последние теории по модифицированию заэвтектических силуминов [6,16] и о роли бимолекулярных пленок оксида алюминия и их действие в расплаве в качестве первичных кремниевых зародышей, вырастающих в кремниевые частицы  $\beta$ -фазы.

Центры бимолекулярных пленок могут быть увеличены образованием фосфида алюминия AlP. Предполагается, что барий при попадании в расплав может загрязнять бимолекулярные центры зарож-



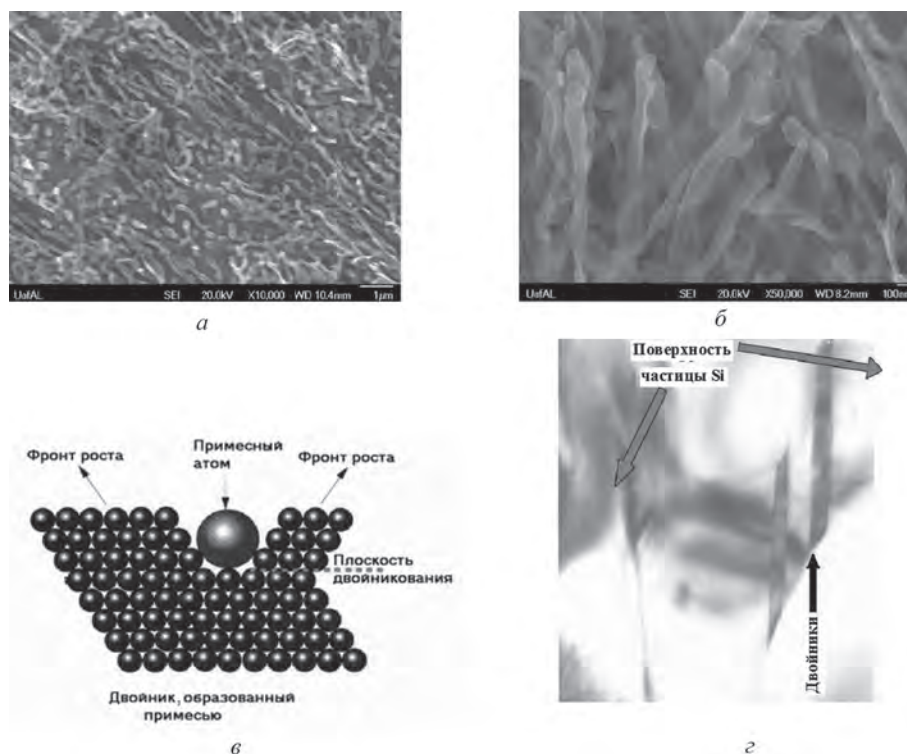


Рис. 4. Микрофотография направленно кристаллизованного сплава Al-17 мас.% Si-3 мас.% Ba ( $V = 0,25$  мм/с): а, б – наноразмерная волокнистая морфология кремния; в – схема образования двойников в кристаллах кремния; г – кремниевая частица, содержащая внутренние двойники [16]

дения  $\beta$ -фазы Si, которые в таком случае становятся неактивными и не могут расти в виде отдельных кристаллов, и по сути, допускают переохлаждение расплава.

Бимолекулярные пленки  $Al_2O_3$  в расплаве действуют в качестве подложки для первичных Si-зародышей, которые впоследствии могут вырасти в  $\beta$ -фазу. Центры зарождения таких подложек могут быть увеличены образованием AlP. В этом случае использование технологии получения алюминиевых лигатур-модификаторов методом экструзии порошковой шихты из алюминия, ПАВ, тугоплавких и специально активированных для технологии in-situ компонентов существенно расширяет возможности комплексной модификации основных структурных составляющих силумина [17,18].

К числу комплексных модификаторов следует отнести лигатуры, в которых в качестве добавок используют порошки в виде наночастиц [8,17–19]. Для введения и синтеза наноразмерных тугоплавких частиц предлагается так называемая технология in-situ. Сущность ее сводится к тому, что порошки на стадии приготовления лигатур подвергают механоактивации или термической обработке таким образом, что при попадании в расплав они активно взаимодействуют с матричным сплавом, одновременно модифицируя и упрочняя структуру материала. При разработке комплексных модификаторов в последние годы интерес исследователей вызывают наноразмерные ультрадисперсные порошки типа  $Al_2O_3$ , TiC, SiC, Nb,  $SiO_2$ ,  $AlN_3$ , стеклоуглерод и др., тугоплавкие химические соединения. Модифицирующая способность таких наночастиц базируется на их большом энергетическом потенциале и огромной удельной поверхности, обеспечивающей при незначительном их содержании ~0,1–0,5 мас.% перекрытие площади границ раздела [17].

В результате совместных исследований ФТИ и ОИМ НАН Беларуси [20] разработаны принципы допирования силуминов несмачиваемым диоксидом кремния и нитридом бора. Так, путем активации исходного порошка, увеличением удельной поверхности до 70 раз и нанесением методом химико-термической обработки на такие частицы титана и бора были получены порошки  $SiO_2$  и TiB с образованным слоем тугоплавких соединений TiB,  $TiB_2$  и дисперсного титана. Использование таких порошков в составе экструдированных алюминиевых лигатур способствует значительному (в 2–3 раза) измельчению  $\alpha$ -фазы (дендритов). Кроме того, при активации порошков гексагонального нитрида бора была установлена интенсификация его разложения и фазового превращения в очень твердый кубический нитрид бора, что позволяет упрочнить силумины на 20–30 %, повысить износостойкость в 2–3 раза.

В качестве комплексного модификатора, позволяющего не только модифицировать, но и упрочнять структуру силумина, в ФТИ НАН Беларуси разработаны алюминиевые лигатуры-модификаторы [21], содержащие карбамид  $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ . Введение таких лигатур в расплав благодаря взаимодействию более активного так называемого атомарного азота (продукта разложения карбамида) с алюминием способствует синтезу в расплаве наноразмерных глобулярных частиц нитридной фазы  $\text{AlN}$  (до 30 нм) (рис.5).

Сравнительные исследования показали, что все эти синтезируемые тугоплавкие элементы способствуют повышению микротвердости как  $\alpha$ -твердого раствора, так и эвтектики. При обработке эвтектического силумина АК12М2МгН (рис. 5) алюминиевыми лигатурами, где в качестве наполнителя использовали  $\text{SiO}_{2(\text{ВТi})}$  в количестве 5 мас.%, стабильно образуется структура, характерная для заэвтектических силуминов с первичными кристаллами кремния  $\beta$ -фазы. Очевидно, что содержание кремния в этом сплаве увеличивается до 15 мас.% по реакции  $\text{SiO}_2 + \text{Al} \rightarrow 2\text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{Si}$ . В этом случае включения оксидов  $\text{Al}_2\text{O}_3$  соответствуют наноуровню и также являются дополнительными центрами кристаллизации.

Однако методы модифицирования с помощью тугоплавких частиц имеют ряд недостатков:

- при получении отливок традиционными методами литья, при длительном выстаивании расплава очень трудно достичь равномерности распределения;
- синтез самих ультрадисперсных частиц, способов их подготовки, завышенное количество требуемых модификаторов для эффективного модифицирования требуют существенной корректировки температурно-временных параметров процесса литья при необоснованном уровне достигаемых свойств;
- технологии ввода и стабилизации таких частиц, исключение коагуляции и седиментации требуют использования специальных устройств.

Важным с практической точки зрения остается вопрос, как, не меняя состав силумина (особенно близкого к доэвтектическим эвтектическим типа АК9, Ал 25, АК12М2МгН и др.), целенаправленно добиться гарантированного формирования эвтектической структуры без дендритов  $\alpha$ -фазы или заэвтектической структуры с дисперсными включениями кремния. Необходимость в таких сплавах при минимальном содержании кремния (9–12 мас.%) связана с перспективой их использования в трибологических сопряжениях (узлах трения), когда благодаря мелким включениям кремния повышается износостойкость сплава, расширяются температурно-нагрузочные условия эксплуатации [21]. В этом случае улучшается обрабатываемость резанием и расширяются возможности для обработки давлением.

В качестве элемента, оказывающего сильное модифицирующее влияние только на кремниевую эвтектическую составляющую, используется стронций в виде алюминиевых лигатур с содержанием Sr 10–50 мас.%. Этот элемент длительное время (до 2 ч) при инкубационном периоде около 5 мин сохраняет модифицирующее действие. Однако в случае дополнительного использования фосфора для зарождения  $\beta$ -фазы он является дезактиватором. Кроме того, ввиду своей токсичности и вредного влияния на здоровье человека стронций не нашел широкого применения в промышленности. Для модифицирования кремния в эвтектике широкое распространение получил натрий в виде солей  $\text{NaF}$ ,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$  как в отдельности, так и в составе многокомпонентных флюсов [3].

Однако совместное введение натрия с фосфором в составе медьфосфористых лигатур для комплексной обработки не оказывает модифицирующего воздействия, более того приводит к огрублению кристаллов кремния [2] по причине того, что у фосфора сродство с натрием больше, чем с алюминием. В этом случае образуется  $\text{Na}_3\text{P}$ , огрубляющий структуру.

В качестве выхода из этого положения для заэвтектических силуминов (содержание Si 16–22 мас.%) предлагалась двухстадийная обработка. На первой стадии при достаточно высокой температуре (не менее 800–850 °С) вводится фосфор, дается длительная выдержка не менее 15–20 мин, затем при снижении температуры расплава до 760–800 °С добавляется натрий. При этом модифицирующее действие обеспечивается при соотношении  $\text{P} : \text{Na} = (3-5) : 1$  (рис.6).

В отличие от специальных технологий литья (непрерывная кристаллизация, гранульные и порошковые процессы, направленная кристаллизация при обработке расплава барием и др.), когда эвтектическая

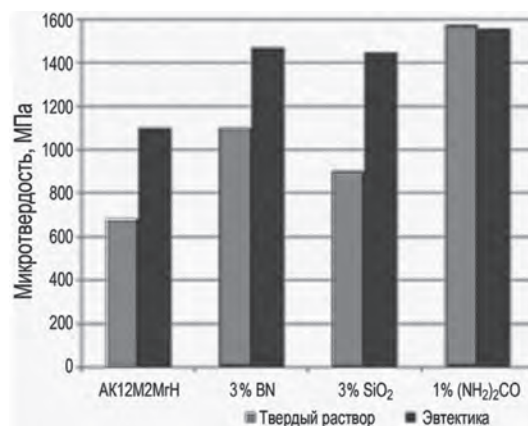


Рис. 5. Значения микротвердости  $\alpha$ -твердого раствора и эвтектики исходного и модифицированных сплавов

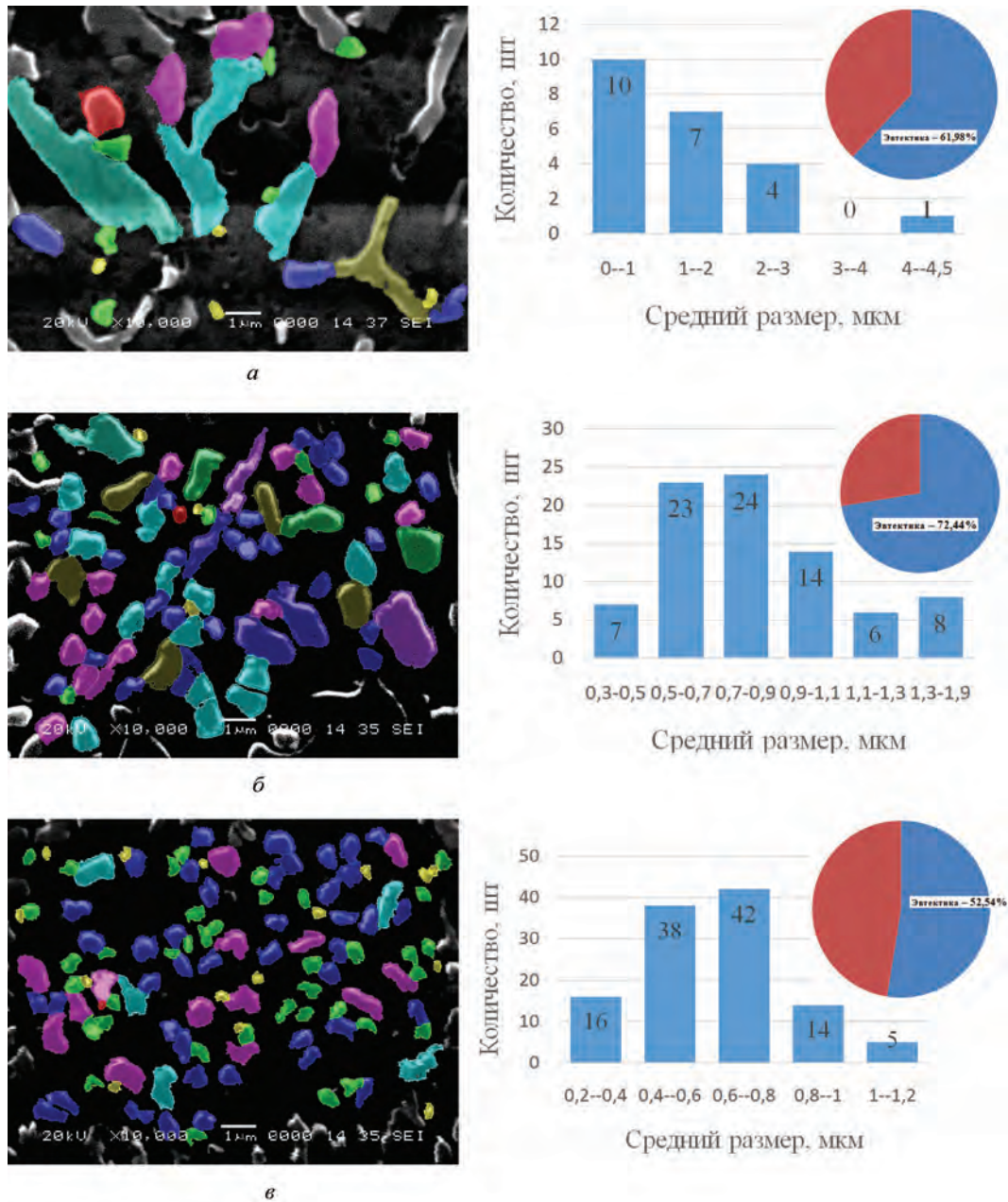


Рис. 6. Микроструктура и номограммы распределения кремния в эвтектике по фракциям в эвтектике силумина АК12М2МгН: а – исходный; б – обработанный лигатурой с NaF; в – обработанный лигатурой с NaPO<sub>3</sub>

точка сдвигается в сторону кремния и весь кремний находится в эвтектике, а первичные кристаллы β-фазы появляются только при его содержании 14–20 мас.%, в ФТИ НАН Беларуси [19] предложен способ модифицирования, основанный на смещении эвтектической точки в сторону алюминия (см. рис. 1). Это позволяет экономить кремний и добиться необходимых свойств материала, в первую очередь триботехнических. Достичь положительных результатов удалось благодаря возможности двойного модифицирования бездендритной структуры силумина при использовании экструдированных алюминиевых лигатур, содержащих натриевые соли фосфорных кислот (триполифосфат, метафосфат, трифосфат натрия) из расчета содержания фосфора не более 0,05–0,12 мас.%

Представленные на рис. 6 сравнительные результаты микроструктуры и номограммы распределения кремния в эвтектике указывают на комплексный характер воздействия трифосфата натрия в составе алюминиевых лигатур. Причем следует отметить его более эффективное воздействие на эвтектический кремний в сравнении с такими сильными модификаторами, как NaF. Ощутимым результатом явился и тот факт, что в структуре доэвтектического АК9, эвтектического АК12М2МгН при кокильном литье стабильно формируются мелкодисперсные кристаллы β-фазы, что позволяет повысить механические



(в том числе пластические) свойства сплава на 40–100 %. Кроме того, уменьшается интенсивность изнашивания на 50–60 %.

Таким образом, благодаря использованию предложенных модификаторов расширяются возможности применения силуминов для более жестких условий форсированной работы в узлах и механизмах машин, в особенности для изделий триботехнического назначения. Обладая достаточным уровнем пластичности (не менее 4–6 %), литейные заготовки из силуминов могут подвергаться обработке давлением для повышения свойств и обеспечения точности формы изделия.

### Литература

1. Ковалев Д. А. Исследование и разработка технологии процесса поперечно-винтовой прокатки для повышения пластичности заэвтектических силуминовых сплавов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2011.
2. Модифицирование силуминов стронцием / Под ред. К. В. Горева. Минск: Наука и техника, 1985. 143 с.
3. Мальцев М. В. Модифицирование структуры металлов и сплавов. М.: Metallurgiya, 1964. 212 с.
4. Марукович Е. И., Стеценко В. Ю. Модифицирование сплавов. Минск: Беларуская навука, 2009. 192 с.
5. Немененок Б. М. Теория и практика комплексного модифицирования силуминов. Минск: Технопринт, 1999. 272 с.
6. Shamsuzzoha M., Nasrac L., Berry J. Nano-Refinement of Eutectic and Primary Silicon Fibers in Al-Si Alloys for High Strength Structural Applications AFS American Foundry Society, Proceedings 2012, p.12–101.
7. Волочко А. Т., Садоха М. А. Алюминий: технологии и оборудование для получения литых изделий. Минск: Беларуская навука, 2011. 387 с.
8. Волочко А. Т., Королев С. П., Галушко А. М., Шегидевич А. А. Анализ структурообразования силуминов // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2013. № 3. С. 18–25.
9. Vanghong H., Hang L. Grain refinement of DIN226S alloy at lower titanium and boron addition levels // Materials Processing Technology. 1998. Vol. 74. P. 56–60.
10. Никитин К. В. Исследование и разработка технологических основ избирательного модифицирования силуминов: Дис. ... канд. техн. наук. Владимир, 2001. 185 с.
11. Venkateswarlu K., Murti B. S., Chacrabarti M. Effect of hot rolling and heat treatment of Al-STi-IB master alloy on the grain refining efficiency of aluminium // Materials Science and Engineering. 2001. Vol. A301. P. 180–186.
12. Nikitin V. I., Jie Wangi, Kandalova E. G., Makarenko A. G., Li Yong. Preparation of Al-Ti-B grain refiner by SHS technology // Scripta Materialia. 2000. Vol. 42. N 6. February 28. P. 561–566.
13. Nikitin V. I., Merzhanov A. G., Makarenko A. G., Kandalova E. G., Lukyanov G. S. SHS method of production of Al-Ti-B master alloy // Book of Abstracts: 4-th International Symposium on SHS. Toledo, Spain, October 6–9, 1997. P. 64.
14. Jie Wanqi, Kandalova E. G., Zhang Ruijie, Nikitin V. I. Preparation of Al<sub>3</sub>Ti/Al composites with SHS method // Rare Metal Materials and Engineering, 2000.
15. Использование комплексного модификатора на основе нанодispersных порошков для повышения качества отливок / А. В. Петридис [и др.] // Технология металлов. 2005. № 1. С. 26–31.
16. Shamsuzzoha M., Juretzko F. R., Haque A. Development of high-strength hypereutectic Al-Si alloys by nano-refining the constituent Si-phases // Aluminum Alloys: Fabrication, Characterization and Application (TMS (The Minerals, Metals & Materials Society)). 2008. P. 207–211.
17. Чернышова Т. А., Кобелева Л. И., Быков П. А. и др. Наноструктурирование дисперсно-армированных алюмоматричных композиционных материалов // Физика и химия обработки материалов. 2012. № 4. С. 53–61.
18. Волочко А. Т., Клущин В. А., Соколов В. Н., Овчинников В. В., Изобелло А. Ю. Поршень двигателя внутреннего сгорания. Пат. РБ 6192, 2010.
19. Волочко А. Т., Шегидевич А. А. Способ получения полуфабрикатов из силуминов. Заявка №а20130910; заявл. 30.07.2013.
20. Волочко А. Т., Комаров А. И., Комарова В. И., Изобелло А. Ю. Модифицирующее воздействие субмикронного диоксида кремния, структурированного наночастицами бора и титана, на процесс формирования микроструктуры и свойств поршневого сплава // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2010. № 2. С. 11–19.
21. Волочко А. Т., Изобелло А. Ю., Овчинников В. В. Комплексная обработка силуминов дисперсными частицами и атомарным азотом // Литье и металлургия. 2009. № 3. С. 218–226.

### References

1. Kovalov D. A. Issledovanie i razrabotka tehnologii protsessa poperechno-vintovoy prokatki dlya povysheniya plastichnosti zaevtekticheskikh siluminovykh splavov [Research and Development of Helical Rolling Technology for Improvement of Plasticity of Hypereutectic Silumin Alloys: CSc Thesis Abstract]. Moscow, 2011. 16 p.
2. Modifitsirovanie siluminov strontsiem [Modification of Silumins by Strontium]. Minsk, Nauka i Tekhnika Publ., 1985. 143 p.
3. Mal'tsev M. V. Modifitsirovanie strukturyi metallov i splavov [Modification of Structure of Metals and Alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1964. 212 p.
4. Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu. Modifitsirovanie splavov [Modification of Alloys]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2009. 192 p.
5. Neimenenok B. M. Teoriya i praktika kompleksnogo modifitsirovaniya siluminov [Theory and Practice of Complex Modification of Silumins]. Minsk, Tehnoprnt Publ., 1999. 272 p.
6. Shamsuzzoha M., Nasrac L., Berry J. Nano-Refinement of Eutectic and Primary Silicon Fibers in Al-Si Alloys for High Strength Structural Applications AFS American Foundry Society, Proceedings 2012. P. 12–101.

7. Volochko A. T., Sadoha M. A. *Alyuminiy: tehnologii i oborudovanie dlya polucheniya lityih izdeliy* [Aluminum: Technology and Equipment for Manufacturing of Cast Products]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2011. 387 p.
8. Volochko A. T., Korolev S. P., Galushko A. M., Shegidevich A. A. Analiz strukturoobrazovaniya siluminov [Analysis of Structure Formation of Silumins]. *Vestsi NAN Belarusi. Ser. fiz.-tehn. navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-Technical Sciences Series*. 2013, no. 3, pp. 18–25.
9. Banghong H. U., Hang L. i. Grain refinement of DIN226S alloy at lower titanium and boron addition levels = *Materials Processing Technology*. 74 (1998), pp. 56–60.
10. Nikitin K. V. Issledovanie i razrabotka tehnologicheskikh osnov izbiratel'nogo modifitsirovaniya siluminov [Research and Development of Technological Basis of Selective Modification of Silumins]. *CSc Thesis*. Vladimir, 2001. 185 p.
11. Venkateswarlu K., Murti B. S., Chacrabarti M. Effect of hot rolling and heat treatment of Al-STi-IB master alloy on the grain refining efficiency of aluminium. *Materials Science and Engineering*. 2001. Vol. A301, pp. 180–186.
12. Nikitin V. I., Jie Wangi, Kandalova E. G., Makarenko A. G., Li Yong. Preparation of Al-Ti-B grain refiner by SHS technology. *Scripta Materialia*, 2000. Vol. 42, no. 6, February 28, pp. 561–566.
13. Nikitin V. I., Merzhanov A. G., Makarenko A. G., Kandalova E. G., Lukyanov G. S. SHS method of production of Al-Ti-B master alloy. *Book of Abstracts: 4-th International Symposium on SHS*. Toledo, Spain, October 6–9, 1997, p. 64.
14. Jie Wanqi, Kandalova E. G., Zhang Ruijie, Nikitin V. I. Preparation of Al<sub>3</sub>Ti/Al composites with SHS method. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2000.
15. Ispolzovanie kompleksnogo modifikatora na osnove nanodispersnykh poroshkov dlya povyisheniya kachestva otlivok [Application of a Complex Modifier based on Nanodispersed Powders for Improvement of Cast Quality]. A. V. Petridis [and others]. *Tehnologiya metallov = Metals Technology*. 2005, no. 1, pp. 26–31.
16. Shamsuzoha M., Juretzko F. R., Haque A. Development of high-strength hypereutectic Al-Si alloys by nano-refining the constituent Si-phases // *Aluminum Alloys: Fabrication, Characterization and Application* (TMS (The Minerals, Metals & Materials Society)), 2008, pp. 207–211.
17. Chernyshova T. A., Kobeleva L. I., Byikov P. A., Bolotova L. K., Kalashnikov I. E., Volochko A. T., Izobello A. Y u. Nanostrukturirovanie dispersno-armirovannykh alyumomatrichnykh kompozitsionnykh materialov [Nanostructuring of Dispersion-reinforced Aluminum Matrix Composite Materials]. *Fizika i himiya obrabotki materialov = Physics and Chemistry of Materials Processing*, 2012. no. 4, pp. 53–61.
18. Volochko A. T., Klushin V. A., Sokolov V. N., Ovchinnikov V. V., Izobello A. Y u. *Porshen dvigatelya vnutrennego sgoraniya* [Piston of Internal Combustion Engine]: BY Patent No. 6192, 2010.
19. Volochko A. T., Shegidevich A. A. Sposob polucheniya polufabrikatov iz siluminov [Method of Production of Semi-finished Products from Silumins]. *Application No. a20130910*; submitted 30.07.2013.
20. Volochko A. T., Komarov A. I., Komarova V. I., Izobello A. Y u. Modifitsiruyushee vozdeystvie submikronnogo dioksida kremniya, strukturirovannogo nanochastitsami bora, ititana, na protsess formirovaniya mikrostruktury i svoystv porshnevnogo splava [Modifying Effect of Submicron Silicon Dioxide Structured with Nanoparticles of Boron and Titanium on Formation of Structure and Properties of Piston Alloy]. *Vestsi NAN Belarusi. Ser. fiz.-tehn. navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-Technical Sciences Series*. 2010, no. 2, pp. 11–19.
21. Volochko A. T., Izobello A. Y u., Ovchinnikov V. V. Kompleksnaya obrabotka siluminov dispersnyimi chastitsami i atomarnym azotom [Complex Treatment of Silumins Using Dispersed Particles and Atomic Nitrogen]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and Metallurgy*. 2009, no. 3, pp. 218–226.

### Сведения об авторах

Волочко Александр Тихонович, Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, ул. Купревича, 10, 220141, г. Минск, Республика Беларусь, E-mail: volochkoat@mail.ru. Тел.: +375296756862.

### Information about the authors

Volochko Alexander, Physical and Technical Institute of National Academy of Sciences of Belarus, 10 Kuprevich Str., Minsk, 220141, Belarus, E-mail: volochkoat@mail.ru. Tel.: +375296756862.