



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-3-23-30>
УДК 621.74: 669.715.018

Поступила 15.06.2020
Received 15.06.2020

ПРОИЗВОДСТВО СИЛУМИНОВ С ВЫСОКОДИСПЕРСНОЙ ИНВЕРТИРОВАННОЙ МИКРОСТРУКТУРОЙ

Е. И. МАРУКОВИЧ, В. Ю. СТЕЦЕНКО, Институт технологии металлов НАН Беларуси, г. Могилев, Беларусь, ул. Бялыницкого-Бирули, 11. E-mail: lms@itm.by

Сделаны термодинамические расчеты структуры металлических расплавов, процессов их кристаллизации и дегазации при эвтектической реакции. Показано, что основными структурными элементами являются нанокристаллы, а пузырьки водорода оказывают непосредственное влияние на морфологию эвтектических кристаллов и процесс структурообразования фаз. Разработаны физико-химические принципы и механизмы модифицирования микроstructures силуминов. Установлено, что основными процессами, влияющими на модифицирование кристаллов фаз, являются интенсивность коагуляции нанокристаллов, рафинирование от адсорбированных атомов кислорода и водорода, предотвращение выделения пузырьков водорода на эвтектических кристаллах. Разработаны экологически безопасные способы литья силуминов с высокодисперсной инвертированной микроструктурой, основанные на смешивании жидкого металла и жидко-твердого сплава, ускоренном затвердевании и структурно-наследственном модифицировании. Разработан антифрикционный силумин, который по фрикционной износостойкости превосходит и заменяет промышленные алюминевые и оловянные бронзы, но дешевле и легче их в 2–3 раза. Разработаны универсальные силуминовые модификаторы для стали, бронзы, чугуна, латуни. Разработаны устройства и кристаллизаторы с затопленно-струйной системой охлаждения, которые в 2–3 раза эффективнее обычных. Создан опытно-промышленный литейный участок по производству сплошных и полых заготовок из силуминов с высокодисперсной инвертированной микроструктурой. Эти заготовки поставляются более чем на 100 промышленных предприятий Беларуси, России, Кореи и Украины.

Ключевые слова. Кристаллизация, модифицирование, нанокристаллы, отливка, расплав, инвертированная микроструктура, антифрикционный силумин, эвтектика.

Для цитирования. Марукович, Е.И. Производство силуминов с высокодисперсной инвертированной микроструктурой / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко // Литье и металлургия. 2020. №3. С. 23–30. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-2-23-30>.

PRODUCTION OF SILUMINS WITH HIGHLY DISPERSED INVERTED MICROSTRUCTURE

Е. И. MARUKOVICH, V. Yu. STETSENKO, Institute of Technology of Metals of National Academy of Sciences of Belarus, Mogilev, Belarus, 11, Bialynitskogo-Biruli str. E-mail: lms@itm.by

Thermodynamic calculations of the structure of metal melts, processes of their crystallization and degassing in the eutectic reaction have been made. It is shown. That the main structural elements are nanocrystals, and hydrogen bubbles have a direct effect on the morphology of eutectic crystals and the phase structuring process. Physical and chemical principles and mechanisms for modifying the microstructure of silumins have been developed. It has been found that the main processes affecting the modification of phase crystals are the intensity of coagulation of nanocrystals, refining from adsorbed oxygen and hydrogen atoms, and preventing the release of hydrogen bubbles on eutectic crystals. Environmentally safe methods of casting silumins with highly dispersed inverted microstructure are developed, based on mixing of liquid metal and liquid-hard alloy, accelerated hardening and structural-hereditary modification. Antifriction silumin has been developed, which in terms of friction wear resistance exceeds and replaces industrial aluminium and tin bronzes, but is cheaper and lighter in 2–3 times. Universal silumin modifiers for steel, bronze, cast iron, brass have been developed. Devices and crystallizers with a flood-jet cooling system have been developed, which are 2–3 times more effective than normal ones. Experimental-industrial casting section for production of solid and hollow billets from silumins with highly dispersed inverted microstructure has been created. These pieces are supplied to more than 100 industrial enterprises of Belarus, Russia, Korea and Ukraine.

Keywords. Crystallization, modification, nanocrystals, casting, melt, inverted microstructure, antifriction silumin, eutectic.

For citation: Marukovich E. I., Stetsenko V. Y. Production of silumins with highly dispersed inverted microstructure. Foundry production and metallurgy, 2020, no. 3, pp. 23–30. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-2-23-30>.

Основная доля деталей из алюминиевых сплавов производится из силуминов. Они обладают относительно низкими удельными стоимостью, массой и высокими литейными свойствами. Основными недостатками заготовок из силуминов являются невысокие технологические, механические и антифрикционные свойства. Чтобы их существенно повысить, необходимо получать отливки с высокодисперсной инвертированной микроструктурой [1]. Но получить с помощью примесных модификаторов (флюсов и лигатур) антифрикционный силумин, который мог бы конкурировать с промышленными алюминиевыми и оловянными бронзами, не удается. Это можно объяснить как теоретическими, так и технологическими причинами.

Недостаточная разработка теории металлических расплавов, кристаллизации и модифицирования сплавов не позволяют понять механизмы модифицирования, инверсии микроструктуры фаз, чтобы разработать способы литья силуминов с высокодисперсной инвертированной микроструктурой. При этом основными технологическими трудностями являются недостаточная охлаждающая способность кристаллизаторов; отсутствие эффективных, экологически безопасных литейных способов ускоренного затвердевания и инвертирования микроструктуры силуминов. Исходя из этого, проведение теоретических и экспериментальных исследований, направленных на производство отливок из силуминов с высокодисперсной инвертированной микроструктурой, создание экологически безопасных способов получения отливок с высокими механическими и антифрикционными свойствами, является актуальной проблемой, имеющей большое научное и практическое значение.

В настоящее время сложились противоречивые представления о кристаллизации и модифицировании сплавов, особенно силуминов. Появилось множество проблемных вопросов, которые нуждались в ответах. Мы попытались разобраться в очень сложных, трудно поддающихся экспериментальному исследованию процессах кристаллизации и модифицирования сплавов и развить некоторые положения теории этих процессов.

Для исследования процессов плавления и кристаллизации непригодны теплофизические методы, поэтому был использован термодинамический метод расчета. Плавление металла является гетерогенным термодинамически равновесным процессом, происходящим при постоянной температуре. Исходя из термодинамических уравнений, показано, что микрокристаллы при плавлении не могут распадаться только на атомы [2]. Поэтому следует полагать, что при плавлении металлов и сплавов часть их ионов забирает свои коллективизированные электроны и образует атомный газ. В результате ослабляется металлическая связь, что приводит к распаду микрокристаллов на нанокристаллы. Установлено, что металлические расплавы – это не однофазные атомные, как принято считать, а двухфазные наноструктурные системы, состоящие в основном из нанокристаллов фаз и атомного газа [2]. С учетом лапласовского давления такая система удовлетворяет уравнению правила фаз, что свидетельствует о ее равновесном состоянии. Наличие стабильных нанокристаллов фаз в металлических расплавах подтверждается экспериментальными результатами, полученными методом SANS (методом малоуглового рассеяния нейтронов) [3–5].

Исходя из термодинамических уравнений, установлено, что с уменьшением радиусов нанокристаллов их удельная межфазная поверхностная энергия не постоянна, как принято считать, а линейно уменьшается [2]. Это означает, что при плавлении и после него нанокристаллы фаз будут иметь очень низкую межфазную поверхностную энергию, что обеспечивает им стабильность в расплаве.

Кристаллизация металла является в основном термодинамически равновесным процессом, происходящим при постоянной температуре. Исключение составляет кристаллизация при очень высоких скоростях охлаждения металлического расплава, когда выделяющейся теплоты затвердевания не хватает, чтобы стабилизировать температуру кристаллизации жидкого металла. Исходя из термодинамических уравнений, установлено, что кристаллы не могут образовываться из крайне нестабильных кластеров [6]. Для этого нужны стабильные нанокристаллы. Вероятность образования кластера, состоящего из 100 и более атомов, равна нулю [7]. Микрокристаллы металлов и сплавов, как правило, являются дендритными кристаллами (дендритами). Каждый дендрит состоит из центра кристаллизации (ЦК) и отростков ветвей. ЦК имеет глобулярную форму и нанометровые размеры. Эффект структурной наследственности свидетельствует о том, что ЦК в металлическом расплаве до определенной температуры сохраняют стабильность, не распадаются. ЦК состоят из более мелких нанокристаллов, что подтверждают исследования микрокристаллов методом электронной микроскопии. Дендриты образуются из ЦК, нанокристаллов и свободных атомов. При этом выделяется теплота кристаллизации.

Высокая скорость процесса кристаллизации металлических расплавов при большой интенсивности теплоотвода объясняется тем, что основными строительными элементами микрокристаллов служат не

атомы, а нанокристаллы. На основании проведенных исследований предложен новый механизм дендритной кристаллизации. Вначале из элементарных нанокристаллов образуются строительные нанокристаллы. Затем из них формируется ЦК. Далее из него и строительных нанокристаллов образуется дендрит. Механизм процесса плавления происходит в обратном порядке. Методом SANS было установлено, что дисперсность элементарных нанокристаллов составляет несколько нанометров, а дисперсность строительных нанокристаллов – несколько десятков нанометров [3–5]. Размер ЦК – сотни нанометров. Это подтверждают исследования микрокристаллов методом электронной микроскопии.

Используя термодинамические уравнения, исследовали влияние пузырьков водорода на эвтектическую кристаллизацию силумина. Было установлено, что образование сферического газового пузырька термодинамически более предпочтительно на более смачиваемой расплавом поверхности [6]. Это подтверждается модельными экспериментами по пузырьковому кипению воды на подложках различной смачиваемости. При кипячении дистиллированной воды объемом 150 см³ в течение 35 мин в двух одинаковых стеклянных стаканах емкостью по 400 см³, при равных условиях нагрева, интенсивность образования и удаления пузырьков пара на хорошо смачиваемой поверхности дна стакана была на 27% выше, чем на плохо смачиваемой поверхности дна другого стакана. Это означает, что при эвтектической кристаллизации силумина пузырьки водорода, выделяющиеся при газоевтектической реакции, будут предпочтительно формироваться и выделяться на смачиваемых эвтектических кристаллах фаз и непосредственно влиять на морфологию кристаллов.

Используя термодинамические уравнения, исследовали влияние атомарного кислорода на процессы кристаллизации силумина. Установлено, что адсорбция атомарного кислорода будет преимущественно осуществляться на нанокристаллах кремния, а нанокристаллы алюминия не будут взаимодействовать с адсорбированным кислородом [8]. Отсюда следует, что атомарный кислород является поверхностно-активным элементом (ПАЭ) для нанокристаллов кремния (β -фазы) и будет оказывать негативное влияние на процесс их коагуляции, препятствовать образованию ЦК.

Используя методы термодинамики, исследовали влияние атомарного водорода на процессы кристаллизации силумина. Установлено, что атмосферные молекулы воды будут взаимодействовать с нанокристаллами алюминия с образованием алюминия и атомарного водорода, который будет растворяться в силуминовом расплаве и адсорбироваться нанокристаллами алюминия (α -фазы) [9]. Отсюда следует, что атомарный водород является ПАЭ для нанокристаллов алюминия (α -фазы) и будет оказывать негативное влияние на процесс их коагуляции, препятствовать образованию ЦК.

На основании проведенных исследований предложены следующие принципы модифицирования микроструктуры отливок из силуминов:

- коагуляционный принцип, согласно которому из нанокристаллов образуются ЦК фаз;
- рафинировочный принцип, в соответствии с которым основной механизм действия модификаторов заключается в связывании демодифицирующих ПАЭ (атомарных водорода и кислорода);
- деблокирующий принцип выделения пузырьков водорода на эвтектических кристаллах силумина, согласно которому предотвращается пузырьковая блокировка роста (разветвления) кристаллов фаз при газоевтектической реакции.

На основании данных принципов модифицирования микроструктуры силуминов были разработаны и предложены физико-химические механизмы модифицирования основных фаз отливок. Так, при модифицировании первичных кристаллов α -фазы действие модифицирующих интерметаллидов основано на рафинировочном принципе (рафинирование от адсорбированного атомарного водорода), а образование ЦК – на коагуляционном принципе [10].

Действие модификаторов (натрия и стронция) эвтектики основано на деблокирующем принципе выделения пузырьков водорода на эвтектических кристаллах силумина. При этом пузырьки водорода выделяются на смачиваемых расплавом натриевой эмульсии или стронциевом коллоиде как на готовых и более предпочтительных межфазных поверхностях [11]. Известно, что натрий и стронций существенно ускоряют процесс дегазации силуминового расплава.

При модифицировании первичных кристаллов β -фазы действие растворенного в жидком силумине фосфора основано на рафинировочном принципе (рафинирование от адсорбированного атомарного кислорода), а образование центров кристаллизации – на коагуляционном принципе [8]. Аналогично фосфору действуют водород, мышьяк, сера, селен, йод. Они образуют летучие оксиды, что облегчает их удаление от нанокристаллов β -фазы и ускоряет реакцию рафинирования от адсорбированного кислорода.

Исходя из принципа структурного и размерного соответствия Данкова-Конобеевского, установлена основная роль неметаллических включений и интерметаллидов при модифицировании силуминов.

Установлено, что неметаллические включения и интерметаллиды в полной мере (по трем плоскостям) не удовлетворяют этому принципу, поэтому не могут быть ЦК фаз [10, 12]. Поэтому при кристаллизации силуминов зародышеобразующая роль продуктов примесного модифицирования не прямая, а косвенная. На основании установленных механизмов модифицирования микроструктуры силуминов следует полагать, что основная роль модифицирующих неметаллических включений и интерметаллидов заключается в связывании (адсорбировании) ими демодифицирующих ПАЭ (водорода и кислорода).

Основные примесные модификаторы не позволяют получать отливки из силуминов с высокодисперсной инвертированной микроструктурой. Из проведенных термодинамических расчетов следует, что в силуминовом расплаве существует большое количество нанокристаллов α - и β -фазы, свободных, частично или полностью, от адсорбированных атомов кислорода и водорода. Поэтому при повышенной скорости затвердевания расплава образуется достаточное количество ЦК всех основных фаз для получения в отливке высокодисперсной микроструктуры. Высокая скорость затвердевания силуминов препятствует дендритной кристаллизации β -фазы и способствует получению инвертированной микроструктуры. Повышенная скорость затвердевания расплава является экологически безопасным способом получения отливок из силуминов с высокодисперсной инвертированной микроструктурой. Кроме того, такие заготовки можно получить разрушением дендритов сплава.

На основании проведенных исследований разработан способ смешивания жидкого металла и жидко-твердого сплава, позволяющий получать отливки из силуминов с высокодисперсной инвертированной микроструктурой [1]. Способ основан на разрушении дендритов сплава Al + 40% Si и последующем диспергировании кристаллов β -фазы. Преимущество данного способа – универсальность, недостаток – относительно малое время живучести (30–40 мин).

Для ускорения затвердевания силуминов разработан способ затопленно-струйного охлаждения кристаллизатора [1]. Охлаждение гильзы обычного (щелевого) кристаллизатора происходит в основном потоком охладителя, движущегося вдоль поверхности охлаждения. В кристаллизаторе с затопленно-струйным охлаждением (струйном кристаллизаторе) струи охладителя ударяют перпендикулярно наружной поверхности гильзы. При этом существенно уменьшается толщина теплового пограничного слоя. Из теории теплопередачи известно, что чем меньше толщина теплового пограничного слоя, тем выше интенсивность теплового потока. Поэтому затопленно-струйный способ охлаждения кристаллизатора более эффективен, чем в случае, когда охладитель движется вдоль поверхности охлаждения. Расчетным путем установлено, что охлаждающая способность струйного кристаллизатора более чем в 2 раза выше, чем у щелевого кристаллизатора [1].

Экспериментальным путем установлено, что линейная скорость затвердевания отливок диаметром 100 мм сплава АК12 в струйном кристаллизаторе в среднем в 3 раза выше, чем в аналогичном щелевом кристаллизаторе. При этом затопленно-струйная система охлаждения обеспечила получение силумина с высокодисперсной инвертированной микроструктурой. Высокая скорость затвердевания такого силумина еще объясняется тем, что его теплопроводность на 55–60% выше, чем у обычного эвтектического силумина с пластинчатыми кристаллами кремния (β -фазы).

Для получения отливок из силуминов с высокодисперсной инвертированной микроструктурой разработан способ литья закалочным затвердеванием [1]. В нем отливка для образования начальной корки толщиной 3–8 мм формируется в металлической водоохлаждаемой форме (кристаллизаторе), а затем извлекается из нее и охлаждается в закалочной ванне. Для интенсификации процесса литья закалочным затвердеванием разработано специальное устройство затопленно-струйного охлаждения отливок в закалочной ванне [1]. Это устройство позволяет диспергировать глобулярные кристаллы β -фазы в отливках АК12 до размера 0,2 мкм.

Затопленно-струйная система охлаждения гильзы кристаллизатора позволяет получать силумины с высокодисперсной инвертированной микроструктурой. При этом процесс литья является экологически безопасным.

Разработан способ литья силуминов в глухдонный струйный кристаллизатор [1]. Он обеспечивает получение мерных отливок с высокодисперсной инвертированной микроструктурой. Разработан способ непрерывного горизонтального литья (НГЛ) силуминов в струйный кристаллизатор для получения непрерывнолитых заготовок с высокодисперсной инвертированной микроструктурой [1, 13].

Использование шихтовых силуминовых отливок с высокодисперсной инвертированной микроструктурой позволило разработать эффективный способ структурно-наследственного модифицирования силуминов для получения заготовок с наследуемой высокодисперсной инвертированной микроструктурой

[1, 14]. Преимущества структурно-наследственного модифицирования силуминов – универсальность модифицирования микроструктуры; экологическая безопасность; отсутствие перемодифицирования; большое (2–3 ч) время живучести процесса модифицирования; минимальные насыщения расплава водородом и оксидом алюминия.

Используя затопленно-струйный способ охлаждения, разработано уникальное технологическое оборудование для литья силуминов ускоренным затвердеванием: глуходонные струйные кристаллизаторы для циклического литья сплошных заготовок; струйный кристаллизатор для НГЛ слитков; устройство для вторичного охлаждения слитков; устройство для циклического литья полых заготовок [1]. Данное оборудование позволяет получать отливки и слитки из силуминов с высокодисперсной инвертированной микроструктурой.

Для повышения антифрикционных свойств силумина АК15 с высокодисперсной инвертированной микроструктурой использовали легирование медью и термообработку по режиму Т5. Установлено, что рациональным содержанием меди в отливке является 3–4%. Это обеспечивает повышение фрикционной износостойкости более чем на 20%. Заготовки из силумина АК15М3 с высокодисперсной инвертированной микроструктурой после термообработки по режиму Т5 имели в среднем дисперсность кристаллов кремния (β -фазы) – 3–4 мкм; временное сопротивление разрыву – 350–450 МПа; относительное удлинение – 3–5%; твердость – 125–135 НВ. Микроструктура таких заготовок представлена на рис. 1.

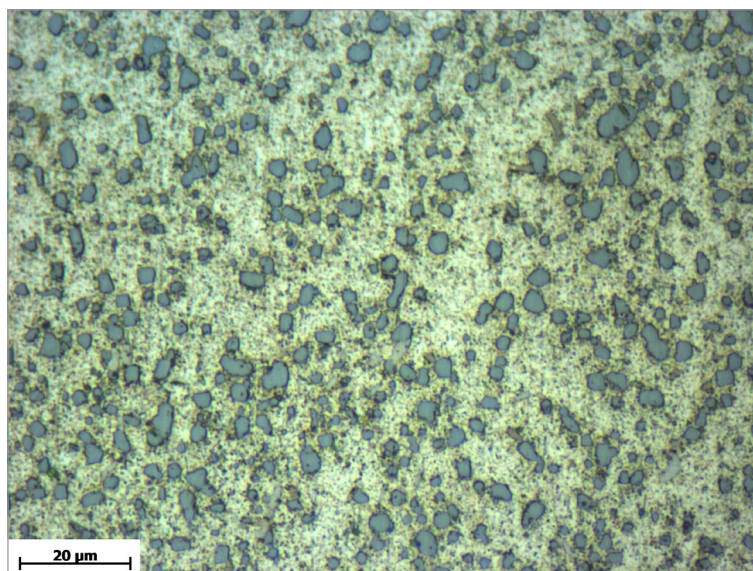


Рис. 1. Микроструктура заготовок из антифрикционного силумина АК15М3.

Кроме повышенных механических свойств, заготовки из силумина АК15М3 с высокодисперсной инвертированной микроструктурой имеют высокие антифрикционные свойства благодаря принципу Шарпи, относительно большой теплопроводности сплава, высоким дисперсности, глобулярности и прочности кристаллов кремния (β -фазы). Установлено, что теплопроводность эвтектического силумина с глобулярным кремнием соответственно в 2 и 3 раза выше, чем у бронз БрОЦС5–5–6 и БрАЖ9–4, а глобулярные кристаллы кремния не выкрашиваются при очень большом давлении. Нож из эвтектического силумина с глобулярным кремнием обладает высокими режущими свойствами и даже царапает стекло. Получен уникальный антифрикционный силумин АК15М3. В условиях сухого трения образцы из этого антифрикционного силумина в паре трения со сталью 45 по фрикционной износостойкости превосходят бронзовые (БрОЦС5–5–5) в среднем в 7 раз, а со смазкой – в 23 раза. При этом антифрикционный силумин АК15М3 имел более низкий коэффициент трения скольжения благодаря эффекту «булыжной мостовой» [15]. Кроме того, антифрикционный силумин АК15М3 по фрикционной износостойкости превосходит бронзы БрОЦС5–5–5 и БрАЖ9–4 при давлении до 100 МПа [16].

Разработаны универсальные, экологически безопасные силуминовые модификаторы для стали, чугуна, бронз и латуни [17]. Эти модификаторы имеют высокодисперсную инвертированную микроструктуру. Примером служит силуминовый модификатор состава: Al – основа; Si – 18%; Ca – 0,4–0,6; Ti – 0,4–0,6; Mg – 4–6%. Его введение в количестве 1% в расплавы бронзы БрАЖ9–4 и латуни ЛЦ40Сд позволяет измельчить фазовые составляющие отливок в среднем на 25%, уменьшить брак по пористости на 8%. Силуминовый модификатор, добавленный в расплав чугуна в количестве 0,6%, делает отливку

перлитной с шаровидным графитом. 0,2% силуминового модификатора измельчает первичное зерно в отливке из стали 35 в среднем в 3 раза.

Детали из антифрикционного силумина АК15М3 прошли опытно-промышленные испытания на многих промышленных предприятиях Республики Беларусь и Российской Федерации [18]. Опытные детали устанавливали в узлах трения машин и механизмов вместо аналогичных деталей из серийных промышленных бронз типа БрАЖ, БрОЦС, БрАЖМц, БрАЖН, БрОФ, БрОС. Установлено, что детали из антифрикционного силумина по износостойкости и (или) ресурсу работы не уступают либо превосходят аналогичные детали из серийных промышленных антифрикционных бронз и могут их заменять [18].

На базе Института технологии металлов НАН Беларуси создан опытно-промышленный литейный участок по производству сплошных и полых заготовок из силуминов с высокодисперсной инвертированной микроструктурой. Их получают на установке НГЛ (рис. 2, а), установке вертикального центробежного литья (рис. 2, б), установке циклического литья (рис. 2, в).

Заготовки из силуминов с высокодисперсной инвертированной микроструктурой поставляются более чем на 100 предприятий Республики Беларусь, Российской Федерации, Кореи и Украины по разработанным ТУ ВУ 700002421.003–2011. За семь лет (2012–2019 гг.) отправлено продукции на сумму, эквивалентную 150 000 долларов США. Заготовки из антифрикционного силумина в среднем на единицу массы в 2,5 раза дешевле проката из алюминиевых и оловянных бронз, но по удельному весу в 3 раза их легче. Поэтому экономический эффект предприятий только от замены бронзовых заготовок на аналогичные из антифрикционного силумина составляет в эквиваленте более миллиона долларов США. Общий вид заготовок из силуминов с высокодисперсной инвертированной микроструктурой показан на рис. 3.

Область применения антифрикционного силумина в промышленности: подшипники скольжения, шестерни червячных колес редукторов, втулки балансиров и шарнирных соединений, вкладыши люнета токарных станков и прессов, втулки сателлитов дифференциалов и сальниковых букс, поршни гидроцилиндров, направляющие втулки и другие детали узлов трения технологического оборудования. Общий вид деталей узлов трения из антифрикционного силумина представлен на рис. 4.

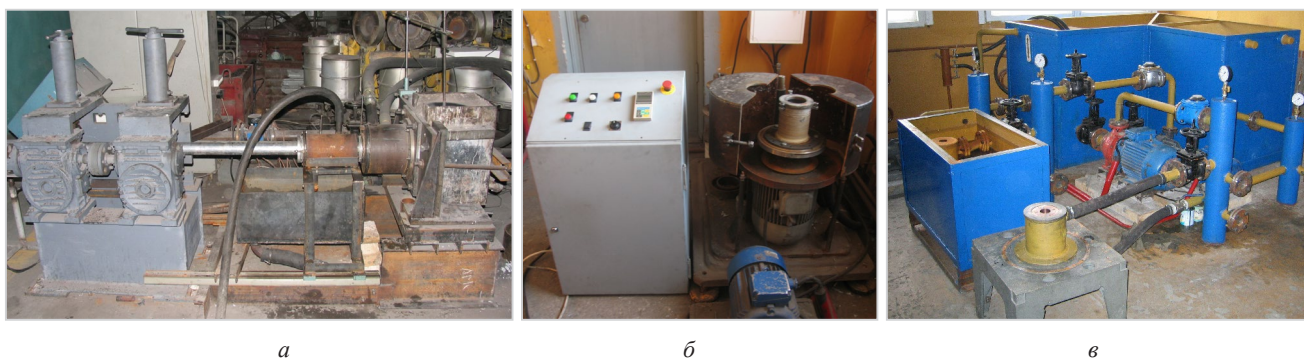


Рис. 2. Опытно-промышленное производство литых заготовок из силуминов с высокодисперсной инвертированной микроструктурой:

а – установка непрерывного горизонтального литья; б – установка вертикального центробежного литья; в – установка циклического литья



Рис. 3. Литые заготовки из силуминов с высокодисперсной инвертированной микроструктурой



Рис. 4. Детали узлов трения из антифрикционного силумина АК15М3

Выводы

Основными научными результатами работы являются:

- термодинамические расчеты структуры металлических расплавов, процессов их кристаллизации и дегазации при эвтектической реакции, в которых основными структурными элементами служат нанокристаллы, а пузырьки водорода оказывают непосредственное влияние на морфологию эвтектических кристаллов и процесс структурообразования фаз;
- физико-химические принципы и механизмы модифицирования микроструктуры силуминов, где основными процессами, влияющими на модифицирование кристаллов фаз, являются интенсивность коагуляции нанокристаллов, рафинирование от адсорбированных атомов кислорода и водорода, предотвращение выделения пузырьков водорода на эвтектических кристаллах фаз;
- экологически безопасные способы литья силуминов с высокодисперсной инвертированной микроструктурой, основанные на смешивании жидкого металла и жидко-твердого сплава, ускоренном затвердевании и структурно-наследственном модифицировании;

что в совокупности позволило разработать антифрикционный силумин АК15М3, который по фрикционной износостойкости превосходит и заменяет промышленные алюминиевые и оловянные бронзы, но дешевле и легче их в 2–3 раза; разработать универсальные силуминовые модификаторы для стали, бронзы, чугуна, латуни; разработать устройства и кристаллизаторы с затопленно-струйной системой охлаждения, которые в 2–3 раза эффективнее обычных; создать экологически безопасное опытно-промышленное производство литых заготовок из силуминов с высокодисперсной инвертированной микроструктурой и поставлять их более чем на 100 промышленных предприятий Беларуси, России, Кореи и Украины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Марукович Е. И., Стеценко В. Ю. Модифицирование сплавов. Минск: Беларуская навука, 2009. 192 с.
2. Марукович Е. И., Стеценко В. Ю. Термодинамические основы плавления металлов // Литье и металлургия. 2020 № 1. С. 14–17.
3. Dahlborg U., Besser M., Calvo-Dahlborg M. et al. Structure of molten Al–Si Alloys // Journal of Non-Crystalline Solids. 2007, vol.353, pp. 3005–3010.
4. Dahlborg U., Kramer M. J., Besser M. et al. Structure of molten Al and eutectic Al–Si alloy studied by neutron diffraction // Journal of Non-Crystalline Solids. 2013, vol. 361, pp. 63–69.
5. Calvo-Dahlborg M., Popel P. S., Kramer M. J. et al. Superheat-dependent microstructure of molten Al–Si alloys of different compositions studied by small angle neutron scattering // Journal of Alloys and Compounds. 2013, vol. 550, pp. 9–22.
6. Марукович Е. И., Стеценко В. Ю. Научная проблема кристаллизации металлических расплавов. Пути решения // Металлургия машиностроения. 2019. № 4. С. 2–4.
7. Марукович Е. И., Стеценко В. Ю. Структура металлического расплава // Металлургия машиностроения. 2020. № 3. С. 15–16.
8. Марукович Е. И., Стеценко В. Ю. О модифицировании первичных кристаллов β -фазы отливок из силумина // Металлургия машиностроения. 2019. № 5. С. 7–8.
9. Марукович Е. И., Стеценко В. Ю. Наноструктуризация в литейных процессах // Литье и металлургия. 2017. № 4. С. 68–71.
10. Марукович Е. И., Стеценко В. Ю. Научная проблема модифицирования первичных кристаллов α -фазы отливок из силумина и пути ее решения // Металлургия машиностроения. 2019. № 3. С. 10–12.
11. Марукович Е. И., Стеценко В. Ю. О модифицировании эвтектики отливок из силумина // Литейное производство. 2018. № 9. С. 6–8.
12. Марукович Е. И., Стеценко В. Ю. К решению научной проблемы модифицирования микроструктуры литейных сплавов // Литейное производство. 2018. № 8. С. 2–4.

13. **Марукович Е. И., Стеценко В. Ю.** Непрерывное горизонтальное литье и свойства антифрикционного силумина // *Металлургия машиностроения*. 2016. № 5. С. 32–34.
14. **Стеценко В. Ю.** Модифицирование вторичных сплавов // *Литье и металлургия*. 2015. № 3. С. 54–56.
15. **Марукович Е. И., Стеценко В. Ю.** Литье силумина. Новые подходы // *Литейное производство*. 2016. № 8. С. 15–18.
16. **Марукович Е. И., Кукареко В. А., Григорчик А. Н., Стеценко В. Ю.** Исследование триботехнических свойств антифрикционного силумина АК15М3 // *Трение и износ*. 2020. Т. 41. № 2. С. 131–138.
17. **Стеценко В. Ю.** Использование структурно-высокодисперсных модификаторов для обработки сплавов черных и цветных металлов // *Литье и металлургия*. 2010. № 3. С. 31–35.
18. **Марукович Е. И., Стеценко В. Ю.** Силумин с глобулярным кремнием – перспективный материал для промышленности // *Литейное производство*. 2017. № 9. С. 6–8.

REFERENCES

1. **Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu.** *Modificirovanie splavov* [Modifying of alloys]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2009. 192 p.
2. **Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu.** Termodinamicheskie osnovy plavleniya metallov [Thermodynamic bases of metal melting]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2020, no. 1, pp. 14–17.
3. **Dahlborg U., Besser M., Calvo-Dahlborg M. et al.** Structure of molten Al–Si alloys. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2007, vol. 353, pp. 3005–3010.
4. **Dahlborg U., Kramer M. J., Besser M. et al.** Structure of molten Al and eutectic Al–Si alloy studied by neutron diffraction // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2013, vol. 361, pp. 63–69.
5. **Calvo-Dahlborg M., Popel P. S., Kramer M. J. et al.** Superheat-dependent microstructure of molten Al–Si alloys of different compositions studied by small angle neutron scattering // *Journal of Alloys and Compounds*. 2013, vol. 550, pp. 9–22.
6. **Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu.** Nauchnaya problema kristallizacii metallicheskih rasplavov. Puti resheniya [The scientific problem of crystallization of metal melts. Solutions]. *Metallurgiya mashinostroeniya = Metallurgy of Machinery Building*, 2019, no. 4, pp. 2–4.
7. **Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu.** Struktura metallichesкого расплава [Structure of metal fusion]. *Metallurgiya mashinostroeniya = Metallurgy of Machinery Building*, 2020, no. 3, pp. 15–16.
8. **Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu.** O modifitsirovanii pervichnykh kristallov β -fazy otlivok iz silumina [On modification of primary crystals of β -phase of silumin castings]. *Metallurgiya mashinostroeniya = Metallurgy of Machinery Building*, 2019, no. 5, pp. 7–8.
9. **Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu.** Nanostrukturizatsiya v litynykh processah [Nanostructuring in casting processes]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2017, no. 4, pp. 68–71.
10. **Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu.** Nauchnaya problema modifitsirovaniya pervichnykh kristallov α -fazy otlivok iz silumina i puti ee resheniya [The scientific problem of modifying the primary crystals of α -phase castings from silumin and the ways to solve it]. *Metallurgiya mashinostroeniya = Metallurgy of Machinery Building*, 2019, no. 3, pp. 10–12.
11. **Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu.** O modifitsirovanii evtektiki otlivok iz silumina [On modification of eutectics of silumin castings]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry. Technologies and Equipment*, 2018, no. 9, pp. 6–8.
12. **Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu.** K resheniyu nauchnoy problemy modifitsirovaniya mikrostrukturnykh litynykh splavov [To solve the scientific problem of modifying the microstructure of casting alloys]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry. Technologies and Equipment*, 2018, no. 8, pp. 2–4.
13. **Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu.** Nepreryvnoe gorizonta'noe lit'e i svoystva antifrikcionnogo silumina [Continuous horizontal casting and properties of antifricition silumin]. *Metallurgiya mashinostroeniya = Metallurgy of Machinery Building*, 2016, no. 5, pp. 32–34.
14. **Stetsenko V. YU.** Modifitsirovanie vtorichnykh splavov [Modifying of secondary alloys]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2015, no. 3, pp. 54–56.
15. **Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu.** Lit'e silumina. Noveye podhody [Silumin casting. New approaches]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry. Technologies and Equipment*, 2016, no. 8, pp. 15–18.
16. **Marukovich E. I., Kukareko V. A., Grigorich A. N., Stetsenko V. Yu.** Issledovanie tribotekhnicheskikh svoystv antifrikcionnogo silumina AK15M3 [Study of the tribotechnical properties of antifricition silumin AK15M3]. *Trenie i iznos = Friction and Wear*, 2020, vol. 41, no. 2, pp. 131–138.
17. **Stetsenko V. Yu.** Ispol'zovanie strukturno-vysokodispersnykh modifikatorov dlya obrabotki splavov chernykh i cvetnykh metallov [Use of highly dispersed structural modifiers for processing of alloys of ferrous and non-ferrous metals]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2010, no. 3, pp. 31–35.
18. **Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu.** Silumin s globulyarnym kremniem – perspektivnyj material dlya promyshlennosti [Silumin with globular silicon – perspective material for the industry]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry. Technologies and Equipment*, 2017, no. 9, pp. 6–8.