

отливок (рис. 3), а также проведенных сопоставлений расчетных контуров отливки при помощи системы компьютерного моделирования литейных процессов ProCAST, получен оптимальный технологический вариант изготовления качественной отливки с плотным строением металла.



Рисунок 3 – Отливка «Водило», полученная по технологии с применением экзотермической прибыли

### Литература

1. **Монастырский, А. В.** Моделирование литейных процессов / А. В. Монастырский // Литейное производство. – 2009. – № 2. – С. 29–34.

2. **Структурообразование и свойства стали в отливках / Л. В. Десницкая [и др.].** – СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского института машиностроения, 2004.

УДК 621.74:669.714

**Е.И. МАРУКОВИЧ**, д-р техн. наук,  
**В.Ю. СТЕЦЕНКО**, канд. техн. наук (ИТМ НАН Беларуси)

### МОДИФИЦИРОВАНИЕ СПЛАВОВ СТРУКТУРНО-ВЫСОКОДИСПЕРСНЫМИ СИЛУМИНАМИ

Основная масса отливок для машиностроения изготавливается из сталей, чугунов, силуминов и бронз. В настоящее время главным

способом повышения их технологических и механических свойств является модифицирование. Для этого разрабатывается большое количество разнообразных модификаторов. Отсутствие их универсальности значительно усложняет и удорожает технологический процесс получения отливок, ухудшает их качество и экологическую обстановку в литейном цехе. Для повышения эффективности действия универсальный модификатор должен отвечать следующим требованиям:

- иметь высокодисперсную микроструктуру;
- быть относительно легкоплавким;
- при модифицировании не образовывать шлаков;
- иметь максимальную степень усвоения расплавом;
- обладать дегазирующей способностью, особенно по водороду;
- иметь высокое сродство к кислороду, азоту, сере и водороду;
- обладать низкой стоимостью;
- иметь простой и высокопроизводительный способ получения.

Всеми этим требованиям отвечает модификатор на основе силумина. Температура его плавления не превышает 700 °С, он легко усваивается расплавами стали, чугуна и сплавов на основе меди и алюминия. Алюминий хорошо растворяется в жидких железе и меди, что способствует максимальному усвоению модификатора без образования шлаков. Его основными компонентами являются алюминий и кремний, которые служат сильными графитизирующими элементами и позволяют получать отливки из чугуна без отбела. Силуминовый модификатор, содержащий P, Ca, Mg, Ti, Sb, PЗМ, является дегазатором, имеющим высокое химическое сродство к кислороду, азоту, сере и водороду. Кроме всего, силумин – это относительно дешевый и доступный материал, обладающим отличными литейными свойствами.

Для осуществления процесса наследственного модифицирования необходимо получение переплава (возврата) с высокой структурной дисперсностью, во многом определяющей продолжительность модифицирующего эффекта при литье заготовок, поскольку с увеличением дисперсности центров кристаллизации время их растворения уменьшается. Это происходит благодаря тому, что в соответствии с уравнениями Толмена и Русанова, межфазное поверхностное натяжение на границе «расплав-центр кристаллизации» снижается с уменьшением размера (радиуса) последнего. Чем выше

дисперсность фазовых составляющих шихтовых материалов, тем более эффективно наследственное модифицирование структуры сплава.

В ИТМ НАН Беларуси разработаны высокопроизводительные способы получения структурно-высокодисперсных силуминовых модификаторов методами литья закалочным затвердевания и литья в струйный кристаллизатор с применением устройства затопленно-струйного вторичного охлаждения [1-4]. Преимущества технологии обусловлены минимальными затратами материальных и энергетических ресурсов, а также возможностью использования отходов и вторичных материалов. Суть литья закалочным затвердеванием заготовок заключается в следующем:

- расплавом с помощью заливного устройства 1 заполняют стационарный 2 и подвижный 3 кристаллизаторы (рис. 1, а);
- после достижения заданного уровня жидкий металл выдерживается для формирования стакана 4 толщиной  $3\div 10$  мм (рис. 1, б);
- с помощью подвижного кристаллизатора 3 происходит извлечение стакана 4 с расплавом 5 и их охлаждение в закалочной ванне 6 (рис. 1, в, г).

По сравнению с непрерывными способами литья данная схема получения заготовок обеспечивает более высокую скорость затвердевания, поскольку устраняется газовый зазор между отливкой и кристаллизатором. Это достигается тем, что формирующаяся заготовка в основном (кроме образования начальной корки) затвердевает непосредственно в закалочной ванне. При этом производительность процесса литья существенно возрастает, поскольку она определяется временем формирования стакана, имеющего минимальную толщину начальной корки. Способ получения заготовок закалочным затвердеванием легко автоматизируется, так как является циклическим. После извлечения стакана с расплавом он перемещается в закалочную ванну, а на стационарный кристаллизатор устанавливается новый подвижный кристаллизатор и цикл литья повторяется. Методом литья закалочным затвердеванием получали цилиндрические заготовки диаметром 45 мм и высотой 200 мм из эвтектического силумина АК18. В этих отливках дисперсность кристаллов первичного и эвтектического кремния в среднем составляла 25 мкм и 0,6 мкм. Тем же методом получали аналогичные заготовки из эвтектического силумина, дисперсность кристаллов эвтектического

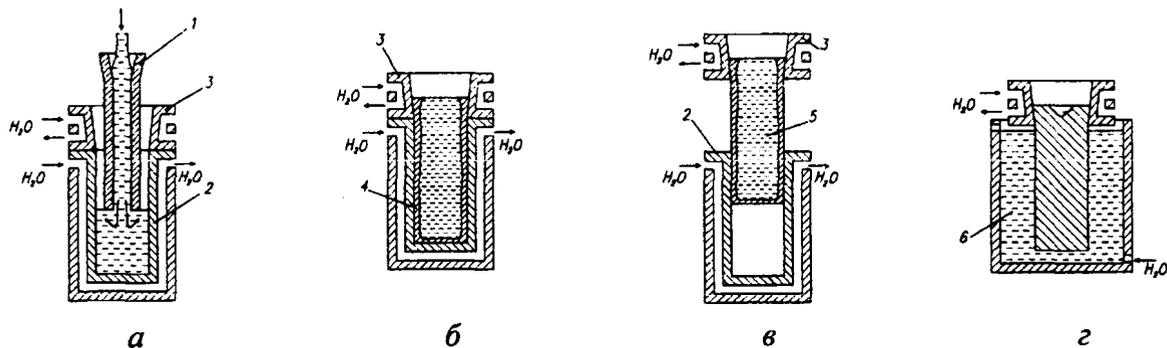


Рисунок 1 – Схема получения отливок методом литья закалочным затвердеванием 1 – заливочное устройство; 2 – стационарный кристаллизатор; 3 – подвижный кристаллизатор; 4 – стакан; 5 – расплав; б – закалочная ванна;

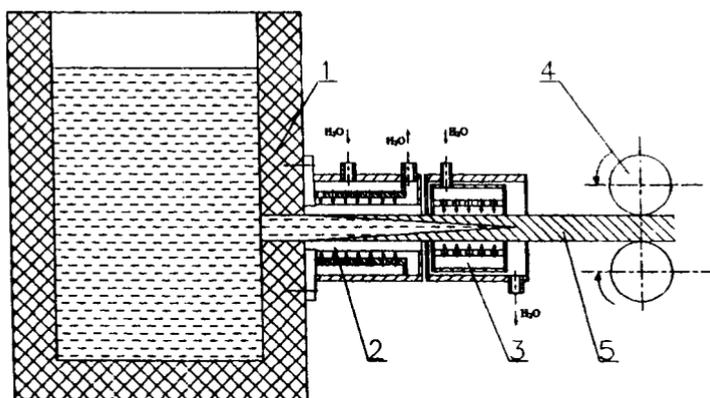
а – заполнение кристаллизатора; б – формирование стакана; в – извлечение стакана с расплавом; г – закалочное затвердевание

кремния в среднем составляла 0,3 мкм. При этом модифицирующие флюсы и лигатуры не применяли.

В кристаллизаторе со струйной системой охлаждения затопленные струи воды ударяются перпендикулярно о поверхность охлаждения, что уменьшает толщину теплового пограничного слоя и увеличивает коэффициент теплоотдачи к охладителю. Струйная система охлаждения гильзы кристаллизатора по сравнению с обычной, где поток воды движется вдоль поверхности охлаждения, повышает коэффициент теплоотдачи более чем в 2 раза [5]. Слитки из силуминов получали на машине непрерывного горизонтального литья в струйный кристаллизатор с устройством затопленно-струйного вторичного охлаждения. Схема процесса литья представлена на рисунке 2. Жидкий металл из металлоприемника 1 поступал в струйный кристаллизатор 2, окончательное затвердевание слитка 5 происходило в устройстве затопленно-струйного вторичного охлаждения 3. При литье силумина в струйный кристаллизатор, по сравнению с обычным, производительность процесса увеличивается в среднем в 3,5 раза. Применение устройства затопленно-струйного вторичного охлаждения повышает производительность процесса литья в 6 раз, при этом дисперсность кристаллов первичного и эвтектического кремния в отливках АК18 диаметром 35 мм в среднем составляли 30 мкм и 3 мкм.

В дальнейшем исследовали влияние наследственного модифицирования заготовок поршней диаметром 54 мм из сплава АК18 с использованием структурно-высокодисперсных слитков, полученных методом литья закалочным затвердеванием. В шихту добавляли не менее 30% отливок от массы плавки. Процесс плавки и разливки металла осуществляли по заводской технологии, но без применения модифицирующих флюсов и лигатур. В результате получены заготовки с модифицированной эвтектикой и размером кристаллов первичного кремния 20–30 мкм как в начале, так и в конце литья, при этом живучесть процесса наследственного модифицирования составляла 2,5 ч. Аналогичные заготовки, полученные по обычной технологии с использованием модифицирующих флюсов и лигатур, имели неоднородную микроструктуру с дисперсностью кристаллов первичного кремния 60–100 мкм. Также были выполнены исследования влияния наследственного модифицирования заготовок поршней диаметром 54 мм из сплава АК18 при применении

структурно-высокодисперсных слитков, полученных методом непрерывного горизонтального литья с использованием струйной системы охлаждения. В шихту вводили непрерывнолитые заготовки в количестве 30, 50 и 100% от веса плавки. При этом было установлено, что при добавлении в шихту 30% заготовок с высокодисперсной микроструктурой живучесть наследственного модифицирования сохранялась в течение 1 ч., при добавлении 50% – 2 ч, при переплаве 100% слитков с высокодисперсной структурой живучесть наследственного модифицирования составляла 3 ч. Размеры кристаллов первичного и эвтектического кремния заготовок поршней в среднем составляли 30 мкм и 6 мкм соответственно. Заготовки поршней, полученные по обычной заводской технологии, несмотря на модифицирование фосфористой медью, серой и натрийсодержащим флюсом, имели микроструктуру с размерами кристаллов первичного и эвтектического кремния соответственно 60–80 мкм и 12–18 мкм.



1 – металлоприемник, 2 – струйный кристаллизатор, 3 – устройство затоплено-струйного вторичного охлаждения, 4 – тянущее устройство, 5 – слиток

Рисунок 2 – Схема непрерывного горизонтального литья в струйный кристаллизатор с устройством затоплено-струйного вторичного охлаждения

Важным в применении структурно-высокодисперсных силуминов является улучшение структурной наследственности заготовок, полученных литьем под давлением, что позволяет решить проблему газовой пористости в отливках. Отмечено, что этот вид дефекта преобладает в тех заготовках, которые имеют крупнокристаллическую структуру. Они образуются вследствие того, что разливку металла на машинах литья под давлением длительное время ведут при относительно низких температурах. В этих условиях эффективность действия модифицирующего флюса уменьшается и начинает преобладать крупнокристаллическая наследственность шихты. Исследования проводили в литейном цехе литья под давлением корпусов электродвигателей из сплава АК12. Из отходов производства методом литья закалочным затвердеванием получали отливки с высокодисперсной микроструктурой, которые добавляли в шихту в количестве 20–30 % от общей загрузки печи. Плавку и разливку металла вели по заводской технологии, модифицирующий флюс не применяли. Полученные заготовки имели мелкокристаллическую микроструктуру с дисперсностью кристаллов эвтектического кремния 1,5–3 мкм. Дисперсность зерна и фазовых составляющих отливок с улучшенной структурой наследственностью в 2–3 раза выше, чем у аналогичных, полученных по обычной заводской технологии. При этом газоусадочная пористость отсутствовала.

Для улучшения структуры непрерывнолитого слитка 300 × 400 мм из стали 45 использовали структурно-высокодисперсный силуминовый модификатор (СВСМ) следующего состава, %: Al – основа, Si – 10–12; Mg – 8–9; Mn – 1; Ca – 0,5; Fe – 0,5 (СВСМ-1). Модификатор вводили в 100-тонный сталь-ковш на штанге, в количестве 0,03% от массы плавки, разливку жидкого металла производили на МНЛЗ-3. Установлено, что модифицирование СВСМ-1 улучшило микроструктуру непрерывнолитого стального слитка по осевой ликвации, ликвационным полоскам и общим трещинам, краевым точечным загрязнениям и подкорковым пузырям. После обжата модифицированной заготовки до размера диаметром 140 мм улучшение структуры наблюдалось по следующим показателям: центральной пористости, точечной неоднородности и подусадочной ликвации. Кроме этого, модифицирование непрерывнолитого стального слитка СВСМ-1 привело к увеличению дисперсности аустенитного зерна в 1,5–2 раза. Таким образом, СВСМ-1 явля-

ется более эффективным модифицирующим средством, чем способ раскисления жидкой стали алюминием и циркуляционное вакуумирование расплава. Поэтому модифицирование жидкой стали структурно-высокодисперсным силуминовым модификатором может частично или полностью заменить раскисление и циркуляционное вакуумирование расплава, тем самым сократив технологический цикл получения слитков и уменьшив их себестоимость.

Для модифицирования структуры отливок из стали 35Л использовали структурно-высокодисперсный силуминовый модификатор следующего состава, %: Al – основа, Si – 27; Ca – 10; Mg – 4; Ti – 1; Fe – 10 (СВСМ-2). Модификатор вводили в ковш емкостью 0,5 т сэндвич-процессом в количестве 0,2% от массы жидкого металла. После модифицирования расплав стали разливали в песчаные формы-пробники и получали заготовки (образцы) размером 15×15×60 мм. Структуру серийных отливок измельчали тяжелым модификатором следующего химического состава, %: Al – 25–30; PЗМ – 30; Cu – 5; Fe – 15; Ni – 20–25. Этот модификатор вводили в количестве 0,2% от массы жидкого металла в ковше. Было установлено, что СВСМ-2 измельчает структуру опытных образцов по сравнению с серийными в 1,7 раза.

СВСМ-1 использовали для модифицирования чугуна следующего состава, %: С – 3,0; Si – 2,0; Mn – 0,8; Cr – 0,4. Температура модифицирования не превышала 1350 °С. Модификатор вводили в количествах 0,3% – 0,6% от массы жидкого металла в ковше. Отливки диаметром 30 мм получали литьем в песчаные формы. Установлено, что СВСМ-1 позволяет получать перлитные заготовки как с вермикулярным, так и с шаровидным графитом. Дисперсность вермикулярных и шаровидных включений графита в среднем составляла 25 мкм. При модифицировании чугуна СВСМ-1 не образовывал шлака и усваивался на 100%. Ввиду относительно низкой температуры плавления этого модификатора его можно использовать для модифицирования ваграночных чугунов, чтобы получить отливки с вермикулярным и шаровидным графитом без отбела и заданной микроструктурой.

СВСМ-1 использовали для модифицирования структуры заготовок из бронзы БрОЦС5-5 в количестве 1% от массы жидкого металла в ковше. Этот модификатор при литье в кокиль позволил уменьшить размер зерна отливок диаметром 30 мм в среднем в 2 раза.

Структурно-высокодисперсный силуминовый модификатор, содержащий Ti, P и Sb, применяли для измельчения микроструктуры отливок из заэвтектического силумина АК18 в количестве 0,5% от массы жидкого металла в ковше. Этот модификатор при литье в кокиль отливок диаметром 30 мм измельчал кристаллы первичного и эвтектического кремния в 3–5 раз. При этом живучесть процесса модифицирования составляла 1,5 часа.

Таким образом, использование структурно-высокодисперсных отливок силумина в качестве части шихты позволяет измельчить микроструктуру заготовок в 2–5 раз и уменьшить их пористость только за счет улучшения их структурной наследственности, а структурно-высокодисперсные силуминовые модификаторы являются эффективными универсальными модифицирующими сплавами.

## Литература

1. **Marykovich, E. I.** Casting of silumins with nanostructure eutectic silicon / E. I. Marykovich, V. Yu Stetsenko // The 66<sup>th</sup> World Foundry Congress 6–9 September, 2004, (Istambul). –P. 1349–1354.

2. Патент RU 2288067 МПК В 22 D 7/00, 27/04.

3. **Марукович, Е. И.** Получение отливок из заэвтектического силумина методом литья закалочным затвердеванием/ Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко // Литье и металлургия. – 2005, – №2. – Ч. 1. – С. 142–144.

4. **Стеценко, В. Ю.** Повышение эффективности непрерывного литья силуминов / В. Ю. Стеценко, А. И. Ривкин, А. М. Певнев // Металлургия и литейное производство: тр. конф. – Жлобин, 2007. – С. 265–267.

5. **Марукович, Е. И.** Повышение эффективности работы кристаллизатора при непрерывном литье слитков / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко // Литье и металлургия. – 2005. – №2. – Ч. 1. – С. 139–141.