



*Short review and analysis of the basic nine well-known ways of the metals and alloys modifying are given. It is shown that casting by means of mixing of one- and two-phase melts, casting by quenching hardening, casting in crystallizer with jet cooling is a powerful and general-purpose means of increase of the modifying efficiency.*

Е. И. МАРУКОВИЧ, В. Ю. СТЕЦЕНКО, ИТМ НАН Беларуси

УДК 621.74:669.714

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МОДИФИЦИРОВАНИЯ

При литье металлов и сплавов модифицирование представляет собой такое воздействие на расплав и его кристаллизацию, при котором происходит измельчение и округление (глобуляризация) элементов микроструктуры, приводящее к повышению механических свойств отливки. Особенно возрастают ее пластические свойства вследствие повышения структурной инверсии сплава. Поэтому целью модифицирования являются повышения дисперсности и степени инвертирования микроструктуры отливки. Примерами могут служить обработки расплава чугуна магнийсодержащими лигатурами и жидкого силумина натрийсодержащими флюсами. При этом происходят диспергирование и глобуляризация графита и кристаллов эвтектического кремния. В результате повышаются механические свойства отливок, особенно их пластичность, что значительно увеличивает технологичность литейных сплавов. Известны следующие виды (способы) модифицирования.

1. Примесное модифицирование — применение модификаторов I и II рода.

2. Модифицирование рафинированием — использование ремодификаторов, раскислителей, десульфураторов, дегазаторов.

3. Термовременное модифицирование — выдержка расплава при различных перегревах.

4. Силовое модифицирование — применение перемешивания расплава, ультразвука, встряхивания, вибрации и других силовых методов воздействия на кристаллизацию отливки.

5. Суспензионное модифицирование — обработка расплава твердыми металлическими порошками (микрохолодильниками).

6. Полевое модифицирование — наложение на кристаллизацию расплава магнитных и электромагнитных полей.

7. Модифицирование смешиванием расплавов.

8. Модифицирование ускорением охлаждения отливки.

9. Наследственное модифицирование — использование в качестве шихты переплава с более дисперсной структурой.

В настоящее время теория модифицирования недостаточно разработана, многие ее положения являются спорными. Поэтому отсутствует единая классификация примесного модифицирования и модификаторов. Одни исследователи модификаторами I рода (основными) считают поверхностно-активные примеси (ПАП), блокирующие рост кристаллов или зерен, а модификаторами II рода — твердые гетерогенные центры кристаллизации [1–3]. Другие авторы дают обратную классификацию, где модификаторами I рода (основными) считают зародышеобразующие гетерогенные примеси, а ПАП являются модификаторами II рода [4–6].

В настоящее время при литье металлов и сплавов в основном применяется примесное модифицирование. Оно подходит для всех видов литья. Главными недостатками примесного модифицирования являются отсутствие универсальности модификаторов, их экологическая небезопасность, относительно малое время живучести. Так, для диспергирования первичных кристаллов кремния в заэвтектических силуминах применяют в основном фосфорсодержащие лигатуры, а для измельчения эвтектических кристаллов кремния — натрийсодержащие флюсы. Известно, что эти модификаторы нейтрализуют друг друга. Кроме того, время живучести натрийсодержащих флюсов не превышает 25–30 мин [7]. Все это создает большие трудности в получении отливок с модифицированной структурой из эвтектического силумина. Поэтому, несмотря на большую перспективность этого материала, он не получил широкого применения, как и многие заэвтектические сплавы. Большинство примесных модификаторов являются химически активными и небезопасными для здоровья человека веществами, которые требуют дорогостоящих вентиляционных и очистных систем.

Для повышения эффективности примесного модифицирования наиболее перспективно использование модификаторов с более дисперсной микроструктурой и увеличение температуры модифицирования [8, 9]. В обоих случаях увеличивается скорость растворения модификаторов и эффективность их действия. В этом направлении действуют физико-химические свойства модифицирующей лигатуры, ее фракция, размеры и т.п. Многие примесные модификаторы являются активными ремодификаторами, раскислителями и десульфураторами. Такое сочетание повышает эффективность примесного модифицирования, благодаря чему оно получило наиболее широкое применение при литье металлов и сплавов.

В настоящее время термовременное модифицирование почти не используется ввиду его слабой изученности и недостаточной разработки. Сочетание этого вида модифицирования с примесным ограничивается относительно малым временем живучести модификаторов.

Силовое модифицирование применяется для литья в металлические формы. Сейчас этот вид модифицирования в основном используется для электромагнитного перемешивания расплава в кристаллизаторе и получения тиксотропных материалов [10].

Суспензионное модифицирование также имеет очень узкое применение в связи со снижением жидкотекучести расплава металлическими порошками и малым временем действия инокулирующего эффекта. Для цветных металлов оно не превышает 10–60 с [11].

Полевое модифицирование не получило широкого применения из-за недостаточной изученности, технологических трудностей для осуществления процесса и относительно слабого эффекта его действия. Интенсифицировать этот вид модифицирования можно путем измельчения фазовых составляющих модификаторов до нанометровых размеров для получения коллоидных металлических растворов. Они наиболее чувствительны к действиям различных магнитных и электромагнитных полей.

Модифицирование смешиванием расплавов также не получило широкого применения по причинам слабой изученности процесса, относительно малого времени его живучести и специфичности применения. Этот вид модифицирования использовался для обработки расплавов чугуна жидкими сталью и чугунами других составов [12]. Модифицирование смешиванием расплавов во многом зависит от термовременных параметров процесса литья (термовременного модифицирования).

Для повышения эффективности модифицирования смешиванием в ИТМ НАН Беларуси разработан метод смешивания одно- и двухфазного расплава (СОДР), который позволяет существен-

но диспергировать первичные кристаллы в отливках из заэвтектических сплавов и повысить степень инверсии их микроструктуры. Непрерывнолитые заготовки диаметром 33 мм из сплава АК18, полученные с использованием метода СОДР, имели дисперсность кристаллов первичного кремния 15–35 мкм. Живучесть процесса модифицирования составляла 30 мин [13]. Установлено, что отливки из такого сплава обладают тиксотропными свойствами и повышенной износостойкостью вследствие значительного увеличения инверсии микроструктуры [14, 15]. Метод СОДР опробован при литье в кокиль антифрикционных сплавов в системах Al–Si, Al–Sb, Al–Fe, Zn–Al–Cu, Pb–Sb. При этом дисперсность первичной фазы в отливках диаметром 30 мм в среднем составляла для Al+5%Fe и Al+10%Sb 20–40 мкм, для Al+18%Si, ЦАМ 10-5 и баббита БС (Pb+18%Sb) – 20–30 мкм. По сравнению с обычным литьем в кокиль применение метода СОДР увеличивает дисперсность кристаллов первичной фазы в 3–5 раз. При этом существенно повышаются пластические свойства сплавов [16]. Высокая эффективность модифицирования методом СОДР объясняется уникальной способностью однофазного расплава основной фазы сплава значительно диспергировать первичные кристаллы и изменять их морфологию в заэвтектическом сплаве, находящемся в двухфазном состоянии.

Модифицирование ускорением охлаждения отливки не получило широкого применения из-за недостаточного эффекта диспергирования микроструктуры заготовок вследствие ограниченных охлаждающих возможностей шелевых кристаллизаторов. Для повышения эффективности этого вида модифицирования в ИТМ НАН Беларуси разработаны метод литья закалочным затвердеванием и кристаллизатор со струйной системой охлаждения (струйный кристаллизатор), обеспечивающие существенное повышение скорости затвердевания отливки. Литье закалочным затвердеванием позволяет получать отливки из силумина с глобулярными кристаллами эвтектического кремния дисперсностью 0,4–0,8 мкм [17]. Кристаллизатор со струйной системой охлаждения по сравнению с обычным шелевым обеспечивает повышение коэффициента теплопередачи от наружной поверхности рубашки более чем в 2 раза [18]. Применение струйного кристаллизатора позволит значительно измельчить и инвертировать микроструктуру заготовок, повысить производительность и стабильность непрерывного литья.

Наследственное модифицирование, разрабатываемое в основном применительно к литью силуминов, в настоящее время не получило широкого распространения. Применяемая технология использования мелкокристаллического шихтового расплава обеспечивает относительно невысокие эффект модифицирования и время живучести, ко-

торое не превышает 10–15 мин [19–21]. Для повышения эффективности наследственного модифицирования силуминов в ИТМ НАН Беларуси разработана новая технология улучшения структурной наследственности заготовок. Она основана на использовании переплава с ультрадисперсной микроструктурой, получаемой методом литья закалочным затвердеванием, который позволяет перерабатывать любые шихтовые материалы независимо от их структурной наследственности (дисперсности микроструктуры). В результате получают заготовки из силумина с наноструктурным эвтектическим кремнием. Использование переплава (возврата) с ультрадисперсной микроструктурой в количестве не менее 20% от массы шихты позволяет с успехом модифицировать заготовки таких сплавов, как АК18, АК12М2 и АК5М7. В результате по сравнению с примесным модифицированием более чем в 2 раза измельчаются не только кристаллы кремния, но и  $\alpha$ -фаза [22–24]. Новая технология наследственного модифицирования обеспечивает живучесть процесса диспергирования фазовых составляющих силуминов в течение 2,5 ч. Это можно объяснить тем, что округлые ультрадисперсные частицы кремния более устойчивы к растворению и седиментации.

Литье силуминов в кристаллизатор со струйной системой охлаждения позволит получать заготовки с высокодисперсной структурой. Поэтому они также могут использоваться для повышения эффективности наследственного модифицирования. Применение метода литья закалочным затвердеванием и литья в струйный кристаллизатор может значительно повысить эффективность примесного модифицирования, поскольку его действие усиливается с измельчением фазовых составляющих модификатора. Так как дисперсность микроструктуры заготовки, получаемой литьем закалочным затвердеванием, во многом зависит и от термовременных параметров процесса литья, то термовременное модифицирование может повысить эффективность многих видов модифицирования.

Таким образом, литье методом СОДР, закалочным затвердеванием и в кристаллизатор со струйным охлаждением являются мощными и универсальными средствами повышения эффективности модифицирования металлов и сплавов.

### Литература

1. Справочник по чугуному литью / Под ред. Н.Г. Гиршовича. Л.: Машиностроение, 1978.
2. Ефимов В.А. Разливка и кристаллизация стали. М.: Металлургия, 1976.
3. Куманин И.Б. Вопросы теории литейных процессов. Формирование отливок в процессе затвердевания и охлаждения сплава: Учеб. пособ. для металлургических вузов и факультетов. М.: Машиностроение, 1976.
4. Гуляев Б.Б. Теория литейных процессов: Учеб. пособ. для вузов. Л.: Машиностроение, 1976.
5. Худокормов Д.Н. Роль примеси в процессе графитизации чугунов. Мн.: Наука и техника, 1968.
6. Строганов Г.Б. Высокопрочные литейные алюминиевые сплавы. М.: Металлургия, 1985.
7. Альтман М.Б., Стромская Н.П. Повышение свойств стандартных литейных алюминиевых сплавов. М.: Металлургия, 1984.
8. Марукович Е.И., Стеценко В.Ю., Соловей А.Г. Повышение эффективности графитизирующего модифицирования чугуна с шаровидным графитом при непрерывном горизонтальном литье // Литье и металлургия. 2000. №3. С. 63–65
9. Никитин В.И. Наследственность в литых сплавах. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 1995.
10. Олейник Л. Обзор методов производства тиксотронных материалов // Металлургия машиностроения. 2001. №2. С. 31–35.
11. Затуловский С.С. Суспензионные разливы. Киев: Наукова думка, 1981.
12. Турбовский М.М. О механизме процесса жидкого модифицирования // Литейное производство. 1956. №2. С. 15–16.
13. Марукович Е.И., Стеценко В.Ю., Брановицкий А.М. Особенности структурообразования при литье заэвтектического силумина с инвертированной микроструктурой // Литье и металлургия. 2001. №4. С. 40–42.
14. Марукович Е.И., Стеценко В.Ю., Радько С.Л. Термовременные параметры и структура заготовок для тиксолития заэвтектических силуминов // Литье и металлургия. 2002. №4. С. 47–48.
15. Марукович Е.И., Стеценко В.Ю., Радько С.Л. Перспективы применения силуминов с инвертированной структурой // Литье и металлургия. 2002. №4. С. 44–46.
16. Марукович Е.И., Стеценко В.Ю., Радько С.Л. Диспергирование первичной фазы антифрикционных силуминов легированием // Литье и металлургия. 2004. №2. С. 167–169.
17. Marykovich E.I., Stetsenko V.Yu. Casting of siluminns with nanostructure eutectic silicon. The 66th World Foundry Congress 6–9 September 2004. ISTANBUL. P. 1349–1354.
18. Марукович Е.И., Стеценко В.Ю. Повышение эффективности работы кристаллизатора при непрерывном литье слитков // Литье и металлургия. 2005. №2. С. 139–141.
19. Никитин В.И., Брагин Д.В., Никитин К.В., Акишин С.А. Повышение качества автомобильного сплава АК9Т // Литейное производство. 2002. №10. С. 11–12.
20. Пыцзе Ли, Никитин В.И., Никитин К.В., Кандалова Е.Г. Исследование наследственного влияния структуры шихты и перегрева расплава на структуру силуминов // Литейное производство. 2001. №5. С. 15–16.
21. Никитин К.В. Наследственное влияние мелкокристаллических модификаторов на свойства алюминиевых сплавов // Литейное производство. 2002. №10. С. 16–18.
22. Марукович Е.И., Стеценко В.Ю., Радько С.Л. Улучшение структурной наследственности поршней заэвтектических силуминов // Литье и металлургия. 2004. №2. С. 159–161.
23. Стеценко В.Ю., Радько С.Л., Карпионов С.В. Модифицирование сплава АК12М2 без применения модифицирующих флюсов и лигатур // Литье и металлургия. 2004. №2. С. 129–130.
24. Стеценко В.Ю., Радько С.Л. Улучшение структурной наследственности поршней из доэвтектического силумина АК5М7 // Литье и металлургия. 2005. №2. С. 127–128.