



The article deals with methods for fine-grained structure of ingots during crystallization depending on the used foundry technologies. It is shown that by using modern scientific and technological advances may improve the traditional and the development of new casting processes, providing production of cast parts with over fine-grained structure and enhanced properties.

Н. К. ТОЛОЧКО, А. А. АНДРУШЕВИЧ, УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»

УДК 621.74

МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ МЕЛКОЗЕРНИСТОЙ СТРУКТУРЫ ОТЛИВОК ПРИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

Литейные технологии отличаются наибольшей эффективностью по сравнению с другими технологиями формообразования, так как позволяют формировать изделия непосредственно из расплава при сравнительно низких затратах энергии, материалов и труда. Уровень развития литейного производства определяется совершенствованием традиционных, разработкой и практическим освоением новых технологий литья на основе использования достижений научно-технического прогресса.

Физическую основу литейных технологий составляет процесс кристаллизации расплава, от характера протекания которого зависит структура и, следовательно, механические свойства литой детали.

Кристаллизация протекает обычно при некоторой температуре $T_k < T_0$, где T_0 – равновесная температура (истинная температура кристаллизации). Чем быстрее охлаждается расплав, тем сильнее возрастает степень его переохлаждения $\Delta T = T_0 - T_k$ и одновременно сокращается время кристаллизации. Расплав тем больше склонен к переохлаждению, чем он чище. Обычно $\Delta T < 10-30$ °С. Кристаллизация начинается с образования в расплаве кристаллических зародышей, которые, достигнув некоторого сверхкритического размера, превращаются в самостоятельные центры кристаллизации, дающие начало росту свободных кристаллов правильной геометрической формы. Растущие кристаллы сближаются друг с другом вплоть до полного столкновения. При этом их рост на границах взаимных контактов прекращается и продолжается только лишь на свободных участках поверхности. В результате образуются кристаллы с нарушенной формой (кристаллиты, или зерна), а затвердевший материал приобретает по-

ликристаллическую структуру, состоящую из множества сросшихся между собой зерен. Различают гомогенное зародышеобразование, когда в результате флуктуации плотности и энергии (температуры) в расплаве возникают плотноупакованные атомные наноразмерные скопления (кластеры), превращающиеся в устойчивые зародыши, и гетерогенное зародышеобразование, когда роль готовых центров кристаллизации играют твердые примесные частицы. Гетерогенное зарождение идет более интенсивно, чем гомогенное, и начинается при меньших переохлаждениях.

Рост кристаллов осуществляется путем присоединения атомов из расплава к элементарным ступенькам, образованным группами атомов на поверхности роста. Обычно это ступеньки винтовых дислокаций, а также ступеньки, возникающие при осаждении на грань кристалла двумерных зародышей.

Существует ряд различий в кристаллизации технически чистых металлов и сплавов. В чистых металлах, представляющих собой однокомпонентные системы, при кристаллизации имеются две фазы: жидкая (расплавленный металл) и твердая (зерна затвердевшего металла). В сплавах, представляющих собой двух- или многокомпонентные системы, твердой фазой являются не только зерна чистого металла, но также зерна твердого раствора и зерна химических соединений. Особенности образования этих фаз неразрывно связаны с характером взаимодействия компонентов расплава при его затвердевании. Большинство металлических компонентов в расплавленном состоянии неограниченно растворимы друг в друге, образуя однофазный раствор с равномерным объемным распределением атомов разных металлов. Если в процессе кристаллизации силы взаимодействия между одновидными атомами больше, чем между разновид-

ными, то после затвердевания образуется кристаллическая структура в виде механической смеси зерен чистых разнородных металлов. В противном случае возникают зерна твердых растворов или химических соединений. Поскольку любые фазы, образующиеся в сплаве, отличаются по составу от исходного расплава, то для гомогенного возникновения устойчивых кристаллических зародышей необходимо наличие не только флуктуации плотности и энергии (температуры), как в случае однокомпонентных гомогенных систем, но и флуктуации концентрации. Наличие в расплаве нескольких определенным образом взаимодействующих компонентов является причиной того, что кристаллизация сплава в отличие от чистого металла, происходит не при одной постоянной температуре, а в некотором постоянном интервале температур. Чем шире температурный интервал кристаллизации сплава, тем больше вероятность развития в нем зон химической неоднородности (ликвации). Так как рост кристаллов в растворе связан с диффузионным перемещением атомов, то скорость роста кристаллов при кристаллизации сплавов меньше, чем при кристаллизации металлов.

Соотношением между скоростью образования и скоростью роста кристаллов определяется степень зернистости кристаллической структуры. Чем меньше зерно металла, тем выше его механические свойства. Мелкозернистые металлы и сплавы в отличие от крупнозернистых имеют более высокую прочность, лучшую сопротивляемость ударным нагрузкам, легче обрабатываются и допускают большие скорости резания.

Измельчение зерна в процессе кристаллизации расплава можно осуществлять с помощью различных методов. К наиболее распространенным относятся методы измельчения зерна, основанные на увеличении глубины переохлаждения расплава, а также на использовании специальных модифицирующих добавок и энергетических воздействий [1, 2].

Размеры образующихся зерен тем меньше, чем больше скорость их образования и чем меньше скорость их последующего роста. Скорость образования зародышей и скорость роста увеличиваются с переохлаждением расплава, причем первая увеличивается быстрее второй. В целом с повышением переохлаждения расплава размер зерна уменьшается. Сильного переохлаждения расплава можно добиться при его кристаллизации в литейных формах, которые имеют низкую температуру, высокую теплопроводность или способны поглощать большое количество тепла. Отвод тепла из расплава на стенку литейной формы усиливается, если последняя имеет большую шероховатость.

Распространению переохлаждения по объему расплава способствуют конвективные потоки, перемешивающие расплав. Массовое зародышеобразование обычно возникает в условиях низкотемпературного литья. Глубокое переохлаждение расплава обеспечивает метод денуклеации. Если центры кристаллизации, которые возникают при малом переохлаждении, устранить (например, путем центрифугирования во время охлаждения), то расплав, лишенный этих первичных центров, можно быстро довести до состояния глубокого переохлаждения, где он быстро закристаллизуется с образованием мелкозернистой структуры.

Измельчение зерна может быть достигнуто за счет увеличения центров гетерогенного зародышеобразования путем введения в расплав специальных модифицирующих добавок в виде мельчайших примесных частиц, практически не изменяющих химического состава металла или сплава. При этом зерно может уменьшаться в десятки раз. При получении отливок в расплав обычно вводят добавки, которые образуют тугоплавкие соединения (карбиды, нитриды, окислы), кристаллизующиеся в первую очередь. Выделяясь в виде микрочастиц, эти соединения служат зародышами кристаллов.

Одним из эффективных методов модифицирования алюминиевых сплавов, который в настоящее время находит все более широкое применение, является использование ультрадисперсных порошков (УДП) тугоплавких соединений в виде охлаждающих частиц – инокуляторов, инициирующих процесс кристаллизации в сплаве. Для лучшего их усвоения из дисперсных порошков карбида кремния (10–100 мкм), оксида алюминия (10–60 мкм) и частиц фосфористой меди (0,1–0,5 мм), алюминия (0,2–1,0 мм), взятых в заданных соотношениях, были приготовлены порошковые составы путем перемешивания компонентов в механическом смесителе, а затем и спрессованы брикеты диаметром 17 мм [3].

Модифицирующей обработке подвергали заэвтектический силумин АК21М2,5Н2,5 (ГОСТ 11583–93) массой 2 кг с температурой расплава 800–820 °С. В расплав после стандартной рафинирующей обработки солевыми флюсами вводили колокольчиком подогретые до 350–400 °С брикеты массой 0,1 кг, выдерживали 4–5 мин и подвергали механическому перемешиванию в течение 5–7 мин. После чего из модифицированного сплава заливали в стальной окрашенный кокиль с температурой 200–220 °С цилиндрические заготовки диаметром 32 мм и высотой 100 мм. Полученные литые заготовки обтачивали, приготавливали микрошлифы, а затем проводили механические испытания на

твердость и прочность, исследование микроструктуры. Одновременно испытывали образцы, полученные из сплава после обработки фосфористой медью 0,1% от массы расплава по стандартной технологии. Твердость по Бринеллю определяли на твердомере ТШ-2 по ГОСТ 9013–59. Испытания на растяжение образцов проводили на универсальной испытательной машине «Инстрон 1195» в соответствии ГОСТ 473.8–81. Микроструктуру силуминов изучали на световом микроскопе «MeF-3» фирмы «Reichert» (Австрия) при увеличении 200. Полученные данные приведены в таблице.

Состав модификаторов и свойства модифицированного силумина АК21М2,5Н2,5

Компоненты, мас.%				Свойства		
Карбид кремния	Оксид алюминия	Фосфористая медь	Алюминий	σ_b , МПа	НВ, $\times 0,1$ МПа	Средняя площадь β -Si, $\mu\text{м}^2$
–	–	100	–	185	100	920
4	3	6	87	240	122	730

Из таблицы следует, что использование в предложенном модификаторе для алюминиевых сплавов УДП обеспечивало повышение твердости и прочности силуминов при сохранении модифицирующего эффекта. Прочность существенно увеличивается за счет уменьшения размеров кристаллов первичного кремния (β -Si). По сравнению с фосфористой медью при модифицирующей обработке заэвтектических силуминов их прочность и твердость повышаются на 22–30% [3].

Из-за малого количества ультрадисперсных частиц карбида кремния и оксида алюминия и относительно дешевой стоимости предложенного порошкового модификатора для алюминиевых сплавов сравнительно невысокая.

При введении в расплав растворимых примесей может очень сильно изменяться поверхностное натяжение, непосредственно влияющее на процессы зародышеобразования. В частности, растворимые поверхностно-активные примеси, концентрируясь в виде монослоев на поверхностях кристаллических зародышей, уменьшают работу образования зародышей, их критические размеры, тем самым, увеличивая скорость зародышеобразования. Вместе с тем, эти примеси не оказывают существенного влияния на скорость роста кристаллов и в результате происходит измельчение зерна.

Измельчение зерна с помощью энергетических воздействий происходит по двум основным причинам: 1) рост числа первичных центров кристаллизации за счет развития явлений кавитации, приво-

дящей к возникновению в расплаве гидродинамических возмущений в виде сильных импульсов сжатия; 2) рост числа вторичных центров кристаллизации за счет дробления ранее возникших кристаллов, имеющих преимущественно дендритные формы. При этом ветви дендритов отрываются. Обычно для этого используются ультразвуковая обработка, механические вибрации, взбалтывание за счет кипения, перемешивание вращающимся магнитным полем и другие виды энергетических воздействий [1,2].

Эффективное измельчение зерна может быть обеспечено при использовании технологий твердо-жидкого литья [4]. Твердо-жидкое литье подразделяется на реолитье и тиксолитье. В реолитье исходным материалом является расплав, который подвергается частичной кристаллизации в условиях интенсивного перемешивания, обычно осуществляемого с помощью электромагнитных полей или механических мешалок. При этом за счет сдвиговых сил происходит измельчение дендритов. В результате материал переводится в твердо-жидкое состояние, в котором он представляет собой суспензию, состоящую из расплава и равномерно распределенных в его объеме мелких глобулярных кристаллических частиц. Полученная твердо-жидкая смесь инжектируется под давлением в литейную форму, где происходит ее полная кристаллизация до формирования отливки с однородной глобулярной мелкозернистой структурой. В тиксолитье исходным материалом являются специально приготовленные твердые заготовки, изначально обладающие однородной глобулярной мелкозернистой структурой (одним из способов их получения является реолитье). Заготовка сначала частично расплавляется (обычно с использованием индукционного нагрева), переходя в твердо-жидкое состояние. Затем она подается в литейную форму, где в ходе деформирования и последующей кристаллизации формируется отливка, также обладающая однородной глобулярной мелкозернистой структурой. Находясь в твердо-жидком состоянии, близком к сверхпластичному, когда мелкие глобулярные зерна легко перемещаются в окружающем их расплаве, заготовка способна довольно легко деформироваться и заполнять литейную форму при сравнительно малом давлении.

Разновидностью технологий твердо-жидкого литья является литье в условиях армирования расплава, т. е. путем введения в изложницу металлических стержней, сеток, проволоки, лент, шаров, а также гранул, стружки и других дисперсных материалов, способствующих отводу тепла и образованию центров кристаллизации.

Дальнейшим развитием технологий твердо-жидкого литья являются технологии рео- и тиксокомпактирования, представляющие собой модифицированные варианты рео- и тиксолитья соответственно [4].

При реокомпактировании в литейную форму сначала вводят расплав, а затем твердые частицы того же состава, что и расплав, которые подвергаются компактированию. Возможен также вариант, когда частицы загружаются в литейную форму, а затем инфильтруются расплавом. При этом частицы, находясь в расплаве, приобретают повышенную подвижность и распределяются по всему объему литейной формы, образуя плотную укладку. В свою очередь, расплав заполняет пространство между частицами. Возможные излишки расплава выдавливаются за пределы литейной формы. В ходе последующей кристаллизации расплава частицы связываются между собой, образуя заготовку.

При тиксокомпактировании в литейную форму загружаются твердые частицы, которые подвергаются частичному плавлению и компактированию. Далее происходят процессы, аналогичные тем, которые имеют место при реокомпактировании, в результате чего также формируется заготовка.

В реокомпактировании, так же как и в реолитье, твердо-жидкое состояние материала достигается в результате образования в исходном расплаве твердых частиц. Однако если в реолитье частицы формируются в ходе кристаллизации расплава, то в реокомпактировании частицы вводятся в расплав извне. В свою очередь, в тиксокомпактировании, так же как и в тиксолитье, твердо-жидкое состояние материала достигается в результате частичного плавления исходных твердых частиц.

Технологии рео- и тиксокомпактирования позволяют эффективно управлять структурой отливки за счет использования специально подготовленных исходных твердых частиц определенной структуры, которые составляют основную часть объема заготовки. В частности, используя исходные твердые частицы с мелкозернистой структурой, можно получать отливки с соответствующей мелкозернистой структурой, доминирующей по всему объему. При этом важно отметить, что структура закристаллизовавшегося расплава также является мелкозернистой, что обусловлено интенсивным зародышеобразованием в расплаве у поверхности твердых частиц (нерасплавившихся ядер частиц).

Особый интерес в связи с этим представляет процесс тиксокомпактирования, в котором и частицы (нерасплавившиеся ядра частиц), и закристаллизованный расплав имеют практически одинаковую мелкозернистую структуру. Это может быть

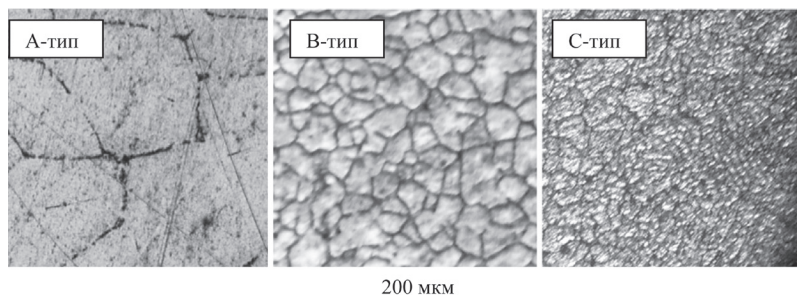
объяснено следующими обстоятельствами. Расплав, образующийся в результате поверхностного плавления частиц, находится в состоянии, близком к равновесному, и, как следствие, содержит значительное число кластеров (т. е. сохраняет квазикристаллическую структуру, подобную структуре частиц). Поэтому в ходе последующей кристаллизации расплава, наступающей сразу же после образования твердой фазы, формируется структура, практически повторяющая по своему строению структуру частиц.

Характер формирования структуры отливки при реализации технологий твердо-жидкого литья в значительной мере определяется особенностями температурных режимов, что подтверждается результатами модельных экспериментов.

В экспериментах использовали алюминиевый сплав (98% Al; остальное Mn, Mg, Si, Cu) с фиксированной точкой плавления-кристаллизации (658 °C). Исходные образцы металла были подвергнуты предварительной переплавке (нагрев до 750 °C и последующее охлаждение до 20 °C). Термическая обработка образцов проводилась в цилиндрическом чугунном тигле, помещенном в электрическую печь. Были реализованы три варианта термической обработки сплава. В первом случае образцы (А-типа) подвергали перегреву до 750 °C и последующему медленному охлаждению до 20 °C. Металл охлаждался вместе с печью (скорость охлаждения составляла около 1 °C/град). Во втором случае образцы (В-типа) подвергали перегреву до 750 °C (по аналогии с первым случаем) и последующему быстрому охлаждению до 10 °C. Металл в тигле охлаждали в воде. В третьем случае образцы (С-типа) подвергали медленному нагреву до точки плавления-кристаллизации (658 °C), выдержке при этой температуре в течение 1 ч и последующему быстрому охлаждению до 10 °C (по аналогии со вторым случаем). Структуру полученных образцов разных типов исследовали с помощью металлографического микроскопа МИМ-8, оснащенного компьютерной приставкой (с использованием соответствующей техники травления).

Были выявлены следующие различия в зернистости слитков: средний размер зерен составлял 320 мкм для слитков А-типа, 35 мкм для слитков В-типа и 6 мкм для слитков С-типа (см. рисунок). Таким образом, слитки А-типа имели самые крупные зерна, наоборот, слитки С-типа – наиболее мелкие зерна.

Влияние температурных режимов процессов плавления и кристаллизации на структурные характеристики полученных слитков объясняется с позиций кластерного механизма процессов плав-



Микроструктуры слитков алюминиевого сплава, сформированных при различных условиях охлаждения

ления и кристаллизации. Согласно этому механизму, плавление кристалла происходит путем отрыва от него как отдельных атомов, так и кластеров; в свою очередь, рост кристалла происходит путем присоединения к нему соответственно как отдельных атомов, так и кластеров, что приводит к уменьшению среднего размера зерна более чем в 5 раз.

Выполненный обзор литейных технологий и представленные экспериментальные результаты показывают, что на основе использования современных научно-технических достижений возможно совершенствование традиционных и разработка новых процессов литья, обеспечивающих получение литых деталей со сверхмелкозернистой структурой и повышенными свойствами.

Литература

1. Толочко Н. К. Основы технологии новых материалов: учеб. пособ. Витебск, ВГТУ, 1996.
2. Калининко А. С., Бергман Г. В. Управляемое направленное затвердевание и лазерная обработка: теория и практика. Минск: Технопринт, 2001.
3. Пат. РБ. Модификатор для алюминиевых сплавов: В22D 21/00, 2008. № 13735.
4. Современные литейные технологии / Н. К. Толочко и др.; под ред. Н. К. Толочко, А. С. Калининко. Минск: БГАТУ, 2009.