

ные ПВМ характеризуются размерами пор от 200 до 500 мкм и обладают способностью улавливать загрязнения размерами от 50 мкм и выше. Такие фильтрующие материалы рекомендуется использовать в фильтрах грубой очистки горюче-смазочных материалов.

Представляется перспективным использование стальных ПВМ в магнитных фильтрах, позволяющих улавливать мельчайшие ферромагнитные загрязнения.

При соответствующем химическом легировании исходных стальных волокон возможно изготовление из них высокотемпературных фильтров для очистки горячих высокотемпературных газов, что весьма актуально для нашей страны при переводе топливно-энергетической базы на местные виды топлива (торф, древесные и другие отходы).

### Литература

1. Новые фильтрующие материалы и перспективы их применения: монография Капцевич В.М. [и др.] / БГАТУ, 2008. – 232 с.
2. Очистка и регенерация смазочных материалов в условиях сельскохозяйственного производства / В. М. Капцевич [и др.]. – Минск, БГАТУ, 2007. – 232 с.
3. <http://antimicrobialcopper.com> – Дата доступа: 25.11.2010.

УДК 621.7

## ФОРМИРОВАНИЕ МЕЛКОЗЕРНИСТОЙ СТРУКТУРЫ ЛИТЫХ ЗАГОТОВОК В ПРОЦЕССЕ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

<sup>1</sup>Толочко Н.К., д.ф.-м.н., профессор; <sup>1</sup>Андрушевич А.А., к.т.н., доцент;  
<sup>2</sup>Шиенок Ю.А., преподаватель

УО «Белорусский государственный аграрный технический университет», г. Минск;

УО «Витебский государственный университет им. П.М. Машерова», г. Витебск

Литейное производство является одной из важнейших отраслей машиностроения, в том числе и сельскохозяйственного машиностроения, занимающегося изготовлением разнообразных сельскохозяйственных машин и механизмов, в которых широко применяются отливки самого различного развеса и номенклатуры. Доля литых заготовок в общей массе продукции сельхозмашиностроения на предприятиях Беларуси достигает 18-20 % и, в связи с высокой эффективностью литейных технологий, в перспективе будет сохраняться на том же уровне [1]. Уровень развития литейного производства определяется совершенствованием традиционных и 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 слитка.

Обычно кристаллизация протекает 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  $\Delta T < 10 \dots 30$  °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). Полученный слиток приобретает поликристаллическую структуру, состоящую из множества сросшихся между собой зерен. Различают гомогенное зародышеобразование, когда в результате флуктуации плотности и энергии (температуры) в расплаве возникают плотно упакованные 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 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 металлов 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 разнovidными, то после затвердевания образу-

ется 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 чистых 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. Мелкозернистые стали сочетают хорошие пластические свойства с высокой прочностью; по сравнению с крупнозернистыми сталями имеют более низкий порог хладноломкости, менее подвержены коррозии, 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. Поэтому в целом с повышением переохлаждения расплава размер зерна уменьшается. Сильного переохлаждения расплава можно добиться при его кристаллизации в литейных формах, которые имеют низкую температуру 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. Так, 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. 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. 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, приводящей к возникновению в расплаве гидродинамических возмущений в виде сильных импульсов сжатия и 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. Эффективное измельчение зерна может быть обеспечено при использовании технологий твердого литья [3].

Твердотельное 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 твердотельное состояние, в котором он представляет собой суспензию, состоящую из расплава и равномерно распределенных в его объеме мелких глобулярных кристаллических частиц. Затем полученная таким образом твердотельная 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 (брикеты), изначально

обладающие однородной глобулярной мелкозернистой структурой (одним из способов их получения является реолитье). Заготовка сначала частично расплавляется (обычно с использованием индукционного нагрева), переходя в твердожидкое состояние. Затем она подается в литейную форму, где в ходе деформирования и последующей кристаллизации формируется отливка, также обладающая однородной глобулярной мелкозернистой структурой. Находясь в твердожидком 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 твердожидкого 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 твердожидкого литья являются технологии рео- и тиксокомпактирования, представляющие собой модифицированные варианты рео- и тиксолитья соответственно [3].

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 слиток.

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 образуется слиток.

В реокомпактировании, также как и в реолитье твердожидкое 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, также как и в тиксолитье, твердожидкое состояние материала достигается в результате частичного плавления исходных твердых частиц.

Технологии рео- и тиксокомпактирования позволяют эффективно управлять структурой слитка за счет использования специально приготовленных исходных твердых частиц определенной структуры, которые составляют основную часть объема слитка. В частности, используя исходные твердые частицы с мелкозернистой структурой можно получать слитки с соответствующей мелкозернистой структурой, доминирующей

по объему слитков. 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 этой связи 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 его образования, формируется структура, практически повторяющая по своему строению структуру частиц.

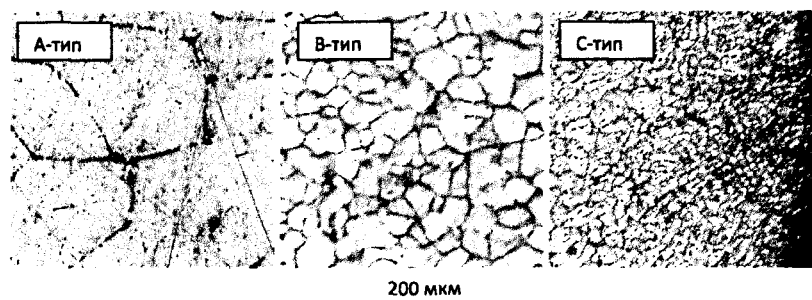
Характер формирования структуры слитка при реализации технологий твердожидкого литья в значительной мере определяются особенностями температурных режимов, свидетельством чему являются результаты описываемых ниже модельных экспериментов.

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 (перегрев до 750 °C и последующее охлаждение до 20 °C). Термическая обработка образцов проводилась в цилиндрическом тигле, помещенном в электрическую печь. Были реализованы три варианта термической обработки. В первом случае образцы (А-типа) подвергались перегреву до 750 °C и последующему медленному охлаждению до 20 °C. Металл охлаждался вместе с печью (скорость охлаждения составляла около 1°С/град). Во втором случае образцы (В-типа) подвергались перегреву до 750 °C (по аналогии с первым случаем) и последующему быстрому охлаждению до 10 °C. Металл охлаждался в воде. В третьем случае образцы (С-типа) подвергались медленному нагреву до точки плавления-кристаллизации (658 °C), выдержке при этой температуре в течение 1 часа и последующему быстрому охлаждению до 10 °C (по аналогии со вторым случаем). Структура полученных слитков разных типов исследовалась с помощью металлографического микроскопа (с использованием соответствующей техники травления).

Были выявлены следующие различия в зернистости слитков: средний размер зерен равнялся 320 мкм для слитков А-типа, 35 мкм для слитков В-типа и 6 мкм для слитков С-типа (рис. 1). Таким образом, слитки А-типа имели наиболее крупные зерна, наоборот, слитки С-типа имели наиболее мелкие зерна.

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

ции. 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.



**Рис. 1.** Микроструктура слитков, сформированных при различных условиях (шлифы)

Рассмотренные процессы формирования мелкозернистой структуры литых заготовок в процессе кристаллизации и установленное влияние температурных режимов плавления и кристаллизации на характеристики структуры позволят управлять механическими и эксплуатационными свойствами получаемых отливок в зависимости от применяемых видов технологий твердожидкого литья.

### Литература

1. Толочко Н.К. Основы технологии новых материалов: учеб. пособие. – Витебск, ВГТУ, 1996. – 116 с.
2. Калиниченко А.С., Бергман Г.В. Управляемое направленное затвердевание и лазерная обработка: теория и практика. – Минск: Техно-принт, 2001. – 367 с.
3. Современные литейные технологии / Н.К. Толочко [и др.]; под ред. Н.К. Толочко и А.С. Калиниченко. – Минск, БГАТУ, 2009. – 359 с.