

УДК 621.746.6:542.65

А. Г. Борисов

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

МЕТОДЫ РЕОЛИТЬЯ, ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ДЛЯ МАЛОГО ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Проведен обзор современных методов реолитья, осуществлена их классификация на основании особенностей организации движения расплава. Подробно рассмотрены методы, перспективные для малого производства.

Ключевые слова: реолитье, низкотемпературная заливка, поток расплава, морфология, сларри, непрерывное литье.

Проведено огляд сучасних методів реолиття, здійснено їх класифікацію на підставі особливостей організації руху розплаву. Детально розглянуто методи, які перспективні для малого виробництва.

Ключові слова: реолиття, низькотемпературна заливка, потік розплаву, морфологія, сларрі, безперервне лиття.

Review of modern methods of rheocasting is done. They were classified on the base of peculiarities of the melt motion. Methos perspective for small production considered in detail.

Keywords: rheocasting, low-temperature casting, melt flow, morphology, slurry, continuous casting.

Введение

Анализ мирового опыта разработки и освоения производства отливок из жидкотвердых сплавов методами реолитья и тиксолитья (Rheocasting, Thixocasting) свидетельствует о безусловной перспективности дальнейшего совершенствования и расширения объемов использования новых технологий вследствие ряда их несомненных преимуществ по сравнению с традиционными технологиями получения отливок из сплавов, находящихся в жидком состоянии [1].

Для промышленного изготовления отливок по технологии реолитья созданы и выпускаются машины фирмами IdraPrince Inc, Holland, Gibbs Die Casting Corp, UBE Machinery Ltd. Промышленный выпуск тиксозаготовок стандартного сечения с использованием процесса непрерывного литья с электромагнитным перемешиванием освоен в ряде стран, например, во Франции. В этой сфере имеется более 100 патентов на различные технологии и специализированное оборудование.

Все методы литья из жидкотвердого состояния с получением первичной фазы с недендритной морфологией обязательной стадией имеют принудительное или естественное перемешивание расплава в некотором устройстве в процессе формирования кристаллов [2]. По характеру организации движения расплава такие технологии могут быть разделены на три группы.

Технологии, относящиеся к первой группе, условно можно назвать «проточными», поскольку исходный перегретый расплав подается на вход устройства, затем движется через него (при этом в процессе движения охлаждаясь и перемешиваясь), выходит из устройства расплав, содержащий нужное количество твердой фазы. В качестве примера можно привести метод с применением (для движения материала) 2-шнековой мешалки [3] или метод с применением наклонной вращающейся охлаждающей бочки [4]. Количество сплава на входе в устройство в таких методах равно его количеству на выходе. Сюда же относятся специальные технологии непрерывного литья.

Ко второму типу можно отнести технологии, в рамках которых устройство

заполняется перегретым расплавом, после заполнения расплав охлаждается и перемешивается внутри него, затем при достижении нужного количества твердой фазы необходимая порция расплава извлекается из устройства для применения. К таким методам, например, относится «прямой метод формирования жидкотвердого состояния» [5]. В данном случае заполнение устройства перегретым расплавом является чисто техническим моментом и происходящие при этом процессы не являются стадией возникновения и формирования в расплаве твердой фазы.

К третьей группе можно отнести технологии, в которых заполнение устройства (металлического кокиля) слабо перегретым расплавом является ключевым моментом, перемешивание расплава в процессе заливки и теплообмен между расплавом и стенками кокиля в процессе его заполнения являются определяющими для формирования недендритной структуры. Имеются также некоторые комбинированные методы, сочетающие признаки разных типов.

Технологии, относящиеся к первой и второй группам, с точки зрения практического применения, требуют сложного специализированного оборудования и ориентированы на крупное промышленное производство литых алюминиевых изделий, которое в Украине отсутствует. В связи с этим в ближайшее время разработка таких отечественных технологий нецелесообразна.

В то же время в Украине существует более ста мелких и средних предприятий, занимающихся литьем алюминиевых сплавов. В этой связи представляется необходимым исследование возможности применения более простых и дешевых технологий приготовления жидкотвердых алюминиевых сплавов с использованием для производства отливок уже существующего парка литейных и прессовочных машин в действующих производствах страны.

Таким требованиям отвечают методики, относящиеся к третьей группе, поскольку они основаны на достаточно простом инструментарии и могут быть использованы для выпуска небольших серий изделий. Для примера на рис. 1 приведены схемы некоторых технологий из этой группы, которые подробно описаны далее.

Преимуществами такого подхода, в рамках которого сплав с недендритной морфологией в жидкотвердом состоянии (сларри) формируется в металлической емкости, являются:

- универсальность – в процессе охлаждения расплав в частично закристаллизованном состоянии может быть использован для реолитья, а после полного застывания представляет собой заготовку для тиксолитья;

- расплав в форме может быть подвергнут изотермической выдержке и соответственно огрублению для преобразования розеточной структуры в глобулярную.

Рассматриваемые методы подразделяются на три группы: чисто заливочные методы, методы с обработкой расплава перед заливкой; методы с обработкой расплава внутри формы в процессе заливки.

Чисто заливочные методы предполагают формирование сларри без принудительного перемешивания путем заливки слабо перегретого расплава с определенной температурой в специальную форму (с определенными геометрическими и теплофизическими параметрами), нагретую до заданной температуры. При этом теплообмен в системе расплав-форма-окружающая среда (воздух) происходит естественным путем, без всякого дополнительного воздействия на систему.

Методы с обработкой расплава перед заливкой предполагают «засевание» расплава зародышами кристаллов перед попаданием расплава в форму.

Методы с обработкой расплава внутри формы в процессе заливки предполагают такое перемешивание расплава внутри формы, которое приводит к тому, что зародившиеся при заливке у стенок формы кристаллы будут выноситься в объем, а интенсивное однородное охлаждение расплава будет способствовать их выживанию.

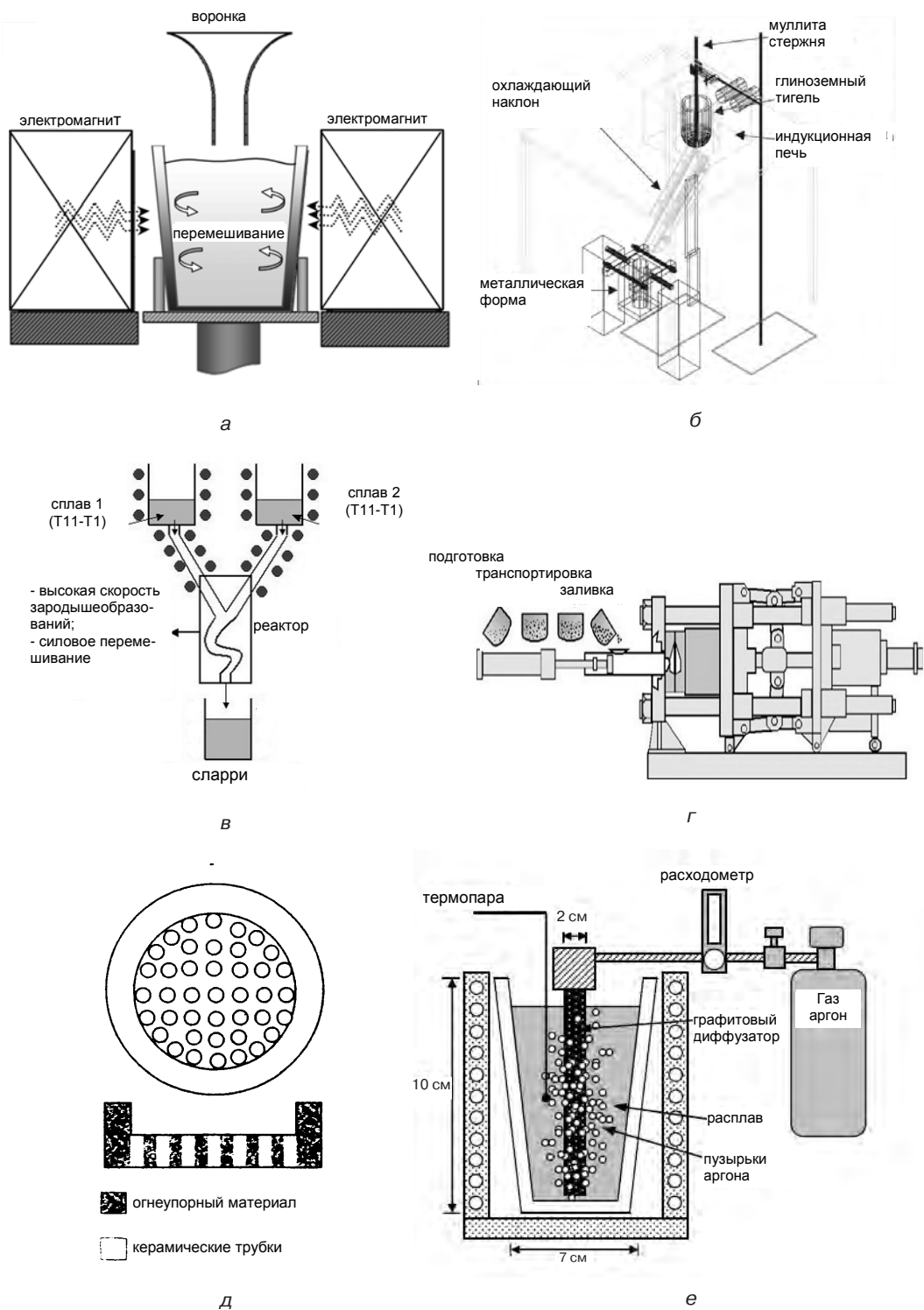


Рис.1. Схемы технологий, относящихся к третьей группе: а – метод Хонг – Нанолитье, б – метод охлаждающего уклона, в – процесс непрерывного рео-преобразования, г – прямой термический контроль в ковше, д – метод смешения двух струй, е – индуцированный газом жидкотвердый процесс

Описание методов

Представлен обзор технологических подходов, перспективных для малых производств, относящихся к третьей группе, а также тех комбинированных методов, практическая реализация которых не требует больших капиталовложений.

Чисто «заливочные» методы

Как уже отмечалось выше, перспективными для малосерийного производства являются технологические подходы, в рамках которых сплав в частично закристаллизованном состоянии (сларри) формируется без принудительного перемешивания, путем заливки слабо перегретого расплава с определенной температурой в специальную форму (с определенными геометрическими и теплофизическими параметрами), нагретую до заданной температуры. Существует несколько таких методов, каждый из них имеет свое название, однако по сути они практически не отличаются, либо отличаются слабо.

Следует отметить, что описание технических деталей предлагаемых методов в некоторых источниках практически отсутствует, что по всей видимости связано с тем, что такая информация является ноу-хау авторов.

Прямой термический метод (direct thermal method) [6] подразумевает установление равновесия температур сплава и формы при некоторой температуре T^ ниже ликвидуса, которой соответствует желаемая доля твердой фазы. Чтобы сплав принял эту температуру, от него нужно отвести некоторое количество теплоты, которое состоит из «термической» части Q_p и скрытой теплоты Q_c , соответствующей количеству выделившейся твердой фазы. Вся эта теплота должна быть поглощена формой, которая за счет этой теплоты должна нагреться от исходной температуры до T^* . Если обозначить количество теплоты, поглощенное формой как Q_ϕ , тогда условие равновесия имеет вид $Q_c + Q_p = -Q_\phi$, то есть расплав с определенной долей твердой фазы имеет такую же температуру, как форма, а именно T^* .*

Предполагается, что процесс выравнивания температур происходит очень быстро, а затем, из-за того что естественный теплоотвод от формы в атмосферу незначительный, устанавливается псевдоизотермический режим, в течение которого общая температура понижается медленно. Формирование недендритной структуры в рамках такой схемы поясняется следующим образом: быстрое охлаждение расплава за счет поглощения теплоты формой приводит к множественному зарождению, а на псевдоизотермическом этапе происходит медленный рост и глобуляризация ростовой структуры.

По данному методу сплав А356 (аналог АК7) при температуре 640 °С заливали в цилиндрическую форму из малоуглеродистой стали (диаметр полости – 53 мм, толщина стенки – 1 мм) комнатной температуры. Полученная морфология кристаллов первичного алюминия в жидкотвердом сплаве здесь и далее фиксировалась путем закалки.

Метод литья в стакан (cup cast method) предполагает такой теплообмен между расплавом и металлическим стаканом, в результате которого должна установиться постоянная (во времени) разность температур расплава и стакана [7]. Предполагается, что у стенок стакана в переохлажденном расплаве происходит множественное зародышеобразование и/или фрагментация ранее образовавшихся дендритов. Эта твердая фаза выносится потоком расплава в центральную область. Затем множество мелких кристаллов однородно охлаждаются, при этом движение расплава приводит к тому, что накапливающиеся на межфазных границах тепло и примесь «смываются» потоком, что приводит к недендритному росту. Метод был опробован (с получением недендритной структуры) для сплава А356. Форма стакана – полуконус, материал – углеродистая сталь, емкость – 1500 г, температура стакана – комнатная, температура заливки – 620 °С.

Прямой термический контроль в ковше (In-Ladle Direct Thermal Control) основан на получении сларри при частичной кристаллизации расплава исключительно

за счет контроля температуры и времени [8]. Сплав A356 с температурой 670 °С заливали в ковш цилиндрической формы, диаметр полости – 40 мм, толщина стенки 6 мм, высота полости – 50 мм. Материал ковша не указан, указана только теплопроводность – 0,057 кал/(см² · с · °С), температура ковша – 500 °С.

Методы с обработкой расплава перед заливкой

Стакан для сларри мультиплексного типа (Multiplex-Type Slurry Cup) представляет собой цилиндрическую форму диаметром 70 мм и высотой 180 мм, изготовленную из нержавеющей стали [9]. Сверху он накрывается специальной керамической крышкой, в которой по окружности имеются отверстия диаметром 6 мм, через которые расплав протекал в форму. Температура заливки составляла 630 °С, температура формы – 250 °С. Метод был опробован (с получением недендритной структуры) для сплава A356.

Метод смешения двух струй [10] отличается от упомянутого тем, что просверлены отверстия по всей площади крышки. На крышку одновременно заливают два расплава сплава A356 – с температурой 600 и 950 °С. Температура формы – 220 °С.

Процесс непрерывного рео-преобразования [11] (Continuous rheoconversion process) также предусматривает смешение двух струй расплава, происходящее в специальном медном реакторе, в котором просверлены каналы таким образом, что два входных канала в теле реактора соединяются в один выходной. Входная температура обеих струй была одинаковой и составляла 625 °С. Эксперименты проводились на сплаве A356.

Метод охлаждающего уклона (cooling slope method). Как видно из названия метода, он предполагает наличие наклонного устройства, через которое расплавленный металл движется под силой тяжести. При этом используются металлические плита, желоб или блок со сквозным отверстием.

Относительно использования металлической плиты отметим, что в работе [12] использовалась плоская водоохлаждаемая плита из мягкой стали длиной 250 мм под наклоном 60°. Для предотвращения смачивания расплавом она была покрыта слоем нитрида бора. Метод опробован для сплава A356, наиболее дисперсная недендритная структура была получена при температуре заливки 620 °С. Заливка осуществлялась в стакан из нержавеющей стали, внутренний диаметр – 40 мм, высота – 70 мм. Практически аналогичные результаты получены в работе [13], где использовали водоохлаждаемую медную плиту длиной 700 мм и толщиной 15 мм, покрытую тонким слоем оксида циркония. Угол наклона плиты – 50°. Заливку проводили в цилиндрический стальной стакан диаметром 80 мм и глубиной 200 мм. Исследовали различные температуры заливки (625, 650 и 680 °С) и стакана (25, 200 и 400 °С). Наиболее мелкую недендритную структуру формировали, как и в предыдущем случае, при температуре заливки 620 °С и комнатной температуре стакана. Исследовался тот же сплав A356. Необходимо отметить, что аналогичные недендритные структуры наблюдались и при обратной постановке задачи [14], а именно при сливании расплава по медной пластине (длина 200 мм, наклон 45°), которая не охлаждалась, а напротив, была предварительно нагрета до 300 °С, однако при этом расплав заливался в цилиндрическую водоохлаждаемую медную изложницу с внутренним диаметром 45 мм.

Применение желоба также позволяет получать недендритную структуру. В работе [15] описано использование желоба из мягкой стали (без водоохлаждения) с покрытием из нитрида бора. Длина желоба – 350 мм, угол наклона – 60°. Для сплава A380 недендритная структура была получена при заливке 615-630 °С. Весьма сходная методика описана в [16], где сплав AlSi8Cu3Fe с минимальным перегревом над ликвидусом (при 605-615 °С) выливался на желоб из мягкой стали, покрытый нитридом бора. Длина желоба – 300 мм, наклон – 60°. Желоб был водоохлаждаемым. Заливку осуществляли в стальной цилиндр диаметром 30 мм и глубиной 150 мм. В работе [17] для сплава Al-8%Si применялся водоохлаждаемый желоб, оптимальный

угол составлял 30°, перегрев расплава – 30 °С. Авторы сообщают, что были получены образцы с недендритной структурой при заливке в стальные формы до 95 мм диаметром и длиной до 350 мм. К сожалению, данные об однородности по длине и радиусу образцов не приводятся.

Помимо плиты и желоба в качестве охлаждающего уклона используется также слив расплава через водоохлаждаемую стальную трубку. Так, в работе [18] при использовании такой трубки была получена недендритная структура для магниевого сплава AM 60, причем верхняя часть трубки была разделена перегородкой, при этом создавались два потока, которые в нижней ее части сливались в один. Угол наклона составлял 45°. Аналогичные результаты были получены в [19], где для сплава алюминий-медь использовали водоохлаждаемую трубку, канал которой имел синусоидальную форму. Следует отметить также еще один метод [20], где расплав Al-6Si-2Mg (wt-%) заливался в зазор между двумя плитами, внутренняя поверхность верхней и нижней – волнистая, совпадающая по фазе, так что зазор между ними получается переменным. Такой «сэндвич» был закреплен на пружинах, к нему прикладывалась вибрация с амплитудой 2 мм.

Методы с воздействием на расплав внутри формы

Заливка с низким перегревом и слабым электромагнитным перемешиванием.

Данный метод можно проиллюстрировать на основе данных работы [21], где недендритная структура была получена для сплава A356, который заливался при температуре 630 °С в цилиндрическую форму из нержавеющей стали диаметром 127 и глубиной 220 мм. Электромагнитное перемешивание осуществлялось 8 с при мощности поля 0,366 кВт. Аналогичные результаты были получены в работе [22], где для сплава Al-7 % Si недендритная структура наблюдалась при заливке в графитовый тигель диаметром 60 и высотой 150 мм. Температура заливки составляла 630 °С, в процессе заливки расплав подвергали перемешиванию электромагнитным полем 0,54 кВт в течение 2 с. В работе [23] – для сплава A356, который заливался в цилиндрическую форму из нержавеющей стали диаметром 80 и глубиной 150 мм. Заливку осуществляли при 630 °С, перемешивание длилось 6 с. Недендритная морфология формировалась при мощности перемешивания 0,44 кВт, увеличение мощности до 1,2 кВт приводило к образованию более дисперсной глобулярной структуры.

Метод Хонг – Нанолитье (Hong-NanoCasting Method) [24]: метод назван по фамилии одного из авторов (Хонг) и названию компании, где работает второй автор (Нанолитье). В рамках настоящего метода расплавленный металл (сплав Al-7 % Si) заливали в контейнер для приготовления сларри, где он остывал при воздействии магнитного поля. Контейнер имел диаметр 50 и высоту 70 мм, толщина стенки составляла 2 мм. Заливка осуществлялась при температуре расплава 630 °С.

Метод получения сларри с ускоренным зарождением (Nucleation accelerated semisolid slurry making method) [25]. В рамках этого метода электромагнитное перемешивание сочетается с заливкой расплава в форму через воронку, то есть сочетает как воздействие на заливаемый расплав, так и на расплав в контейнере для формирования сларри. Использовался сплав Al-8 % Si-3 % Cu (ADC10), тигель из нержавеющей стали диаметром 50 и высотой 100 мм, его внутренняя поверхность была покрыта нитридом бора. Воронка имела коническую форму. Температура заливки составляла 620 °С.

Устройство для вихревого уравнивания энтальпии (Swirled Enthalpy Equilibration Device) [26]. В основу данного метода заложен принцип, аналогичный «заливочным» методам – быстрое охлаждение расплава за счет теплообмена с формой. При этом тепловая масса стальной формы подбирается таким образом, чтобы баланс температур формы и расплава установился при доле твердой фазы 30-45 %. Однако в отличие от «заливочных» методов в данном случае форма в процессе охлаждения расплава вращается со скоростью 200 об/мин с эксцентриситетом 12 мм.

Длительность процесса составляет от 30 до 60 с для порций алюминиевого сплава – от 1 до 6 кг. Заливка осуществляется при 620 °С.

Индукцированный газом жидкотвердый процесс (Gas Induced Semi-Solid Process) [27]. Хотя данный метод не предусматривает заливки расплава в металлическую форму, он включен в настоящий раздел на том основании, что по мнению авторов при реализации метода создаются условия, воспроизводящие процессы, имеющие место при заливке расплава в холодную форму. Использовали цилиндрический тигель из нержавеющей стали, покрытый изнутри нитридом бора, в него помещали навеску сплава А356 массой 600 г. Тигель с навеской нагревали в печи, после расплавления тигель вынимали и он остывал на воздухе. При достижении температуры 625 °С в расплав погружали графитовый диффузор, подсоединенный к баллону со сжатым аргоном и включали продувку газом (расход 2 л/мин), которая продолжалась до достижения доли твердой фазы 10 %, после чего диффузор вынимали. Быстрый теплоотвод из расплава осуществляли на поверхности диффузора аналогично теплоотводу через стенки холодной формы при заливке, а движение пузырьков газа создавало потоки, аналогичные возникающим при заполнении формы.

Обсуждение и сравнение

В данном разделе при сопоставлении между собой различных методов рассматриваются только те работы, которые были выполнены для сплава А356 или близких к нему по составу.

Чисто заливочные методы

Во всех работах, посвященных чисто заливочным методам [6-8], отмечается, что причинами формирования недендритной структуры являются быстрое установление баланса температур расплава и формы после заливки, а также последующее относительно медленное охлаждение. Соответствующие термограммы схематически приведены на рис. 2. Следует отметить, что из-за инерционности термопар при низкой температуре заливки не удалось зафиксировать стадию быстрого начального охлаждения. Как видно из рисунка, ход температурных кривых на стадии «медленного охлаждения» заметно отличается. Если кривым А и Б соответствуют близкие скорости охлаждения – 0,24 и 0,22 °С/с, то для кривой В – 0,33 °С/с.

Основные параметры таких методов приведены в табл. 1.

Как уже отмечалось выше, использовавшиеся устройства не во всех публикациях описаны детально. Соответственно в этой и последующих таблицах данные приведены в таком виде, в котором они были изложены в первоисточниках.

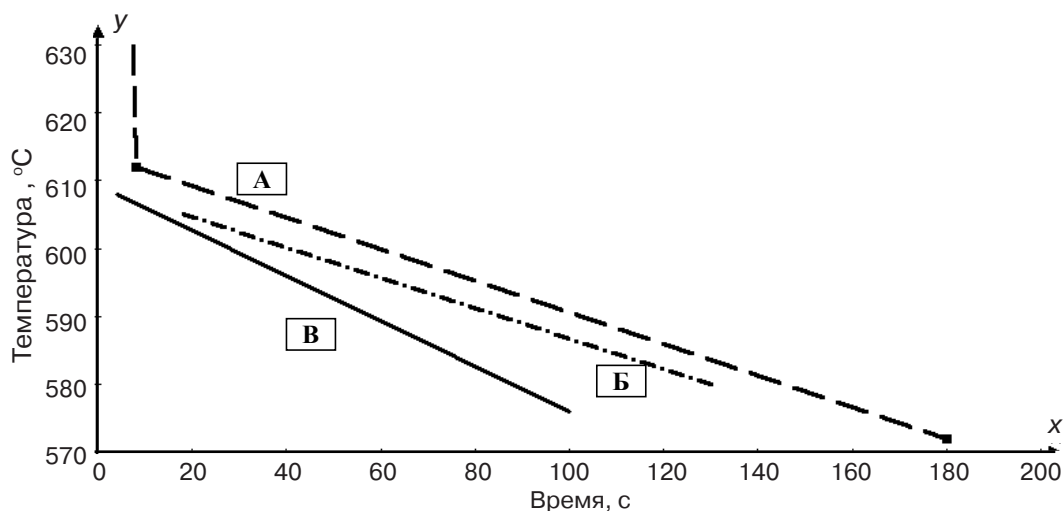


Рис. 2. Температурные кривые для чисто заливочных методов: А – прямой термический контроль в ковше; Б – прямой термический метод; В – метод литья в стакан

Таблица 1. Основные параметры методов

| Метод | Сплав | Температура заливки, °С | Температура формы, °С | Форма цилиндр, описание |
|---|-------|-------------------------|-----------------------|--|
| Прямой термический [6] | А356 | 640 | 20 | малоуглеродистая сталь, диаметр полости 53 мм, толщина стенки 1 мм |
| Литье в стакан [7] | А356 | 620 | 20 | углеродистая сталь, емкость 1,5 кг |
| Прямой термический контроль в ковше [8] | А356 | 670 | 500 | материал с теплопроводностью 0,057 кал/см ² |

Методически прямой термический метод и метод литья в стакан практически не отличаются – заливка сплава с низким перегревом над ликвидусом (620-640 °С) в металлическую цилиндрическую емкость комнатной температуры. Что же касается метода прямого термического контроля в ковше, то следует отметить, что в первоисточнике он описан весьма туманно, вследствие чего его сущность не понятна, что делает невозможным его сравнение с другими методами.

На рис. 3, а-в показаны соответствующие микроструктуры. Здесь и далее для возможности сопоставления размеры оригинальных фотографий из разных источников изменены так, чтобы на данных рисунках все они были с одинаковым увеличением. Вследствие того, что исходные фотографии в публикациях имели различный размер и увеличение, не всегда было возможно скомпилировать «правильный» рисунок с компонентами одинакового размера.

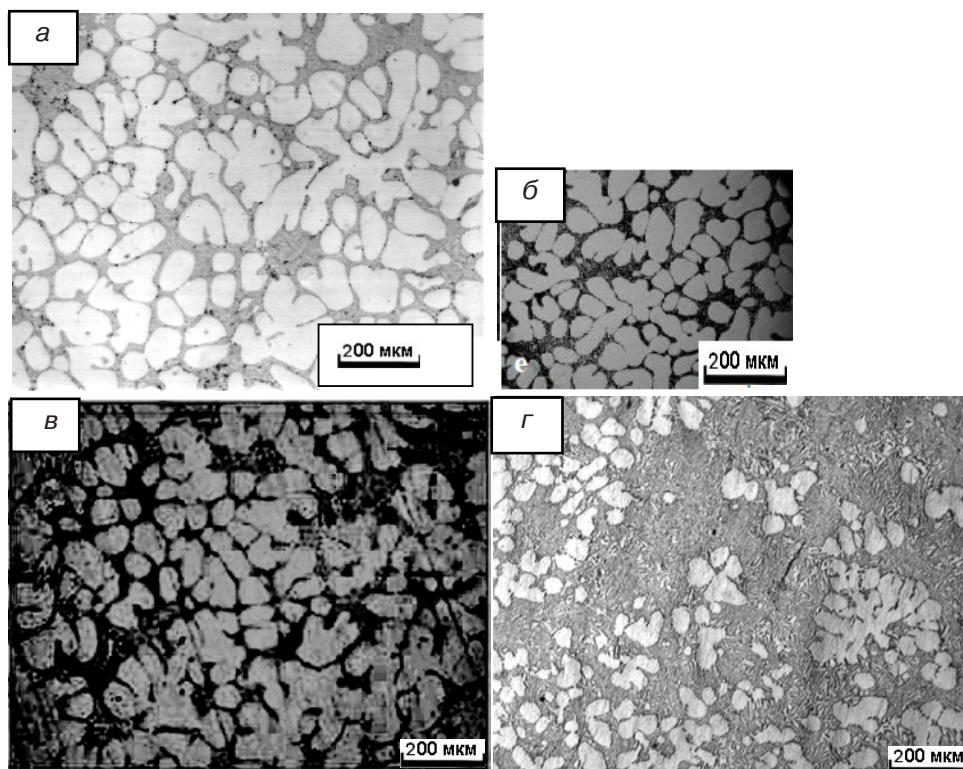


Рис. 3. Морфология образцов, получаемых чисто заливочными методами: а – прямой термический метод; б – метод литья в стакан; в – прямой термический контроль в ковше; г – данные автора, заливка прямым термическим методом, сплав Al – 10,2 %мас. Si

Следует отметить, что авторы такие структуры характеризуют как «глобулярные» с размером 100 мкм (рис. 3, а) и 50 мкм (рис. 3, б) структуру (рис. 3, в) авторы не характеризовали. На наш взгляд это представляется не вполне очевидным. Действительно, если обратить внимание на рис. 3, г, где белым кругом выделена ветвящаяся розеточная структура (данные автора, заливка прямым термическим методом, сплав Al – 10,2 %мас. Si), то становится заметно определенное сходство со структурами, выделенными на рис. 3, а-в). Таким образом возможно предположить, что за отдельные глобулы принимались структурные элементы розеток, которые действительно имели такие видимые размеры, на самом деле составляющие единое целое в объеме (розетку с размером более 200 мкм).

В целом структуры, получаемые чисто «заливочными» методами, между собой достаточно схожи, единственное отличие – «метод литья в стакан» (рис. 3, б) дает несколько более мелкую морфологию.

Методы с обработкой расплава перед заливкой

В методах с воздействием на заливаемый расплав наиболее распространенным подходом является использование охлаждающего уклона [12-20]. Параметры процессов для различных литературных источников приведены в табл. 2. Температура формы во всех случаях комнатная.

Таблица 2. Параметры процессов для различных литературных источников [12-20]

| Источ-ник | Метод охлаждающего уклона | Длина, мм | Угол наклона, ° | Темпера-тура заливки на уклон, °С | Форма цилиндра, описание | Сплав |
|-----------|---|-----------|-----------------|-----------------------------------|--|-------------------|
| [12] | водоохлаждаемая плита, мягкая сталь, покрытая нитридом бора | 250 | 60 | 620 | нержавеющая сталь, Ø 40 мм, высота 70 мм | А356 |
| [13] | водоохлаждаемая медная плита, покрытая оксидом циркония, толщина 15 мм | 700 | 50 | 620 | сталь, Ø 80 мм, глубина 200 мм | А356 |
| [15] | желоб из мягкой стали, покрытый нитридом бора | 350 | 60 | 615-630 | – | А380 |
| [16] | желоб из мягкой стали, покрытый нитридом бора | 300 | 60 | 605-615 | Ø 30 мм, глубина 150 мм | AlSi8Cu3Fe |
| [17] | водоохлаждаемый желоб | – | 30 | перегрев 30 °С | сталь, Ø 95 мм, высота 350 мм | Al-8 % Si |
| [20] | расплав заливался в зазор между двумя стальными плитами с волнистой поверхностью, прикладывалась вибрация | – | – | – | – | Al-6Si-2Mg (wt-%) |

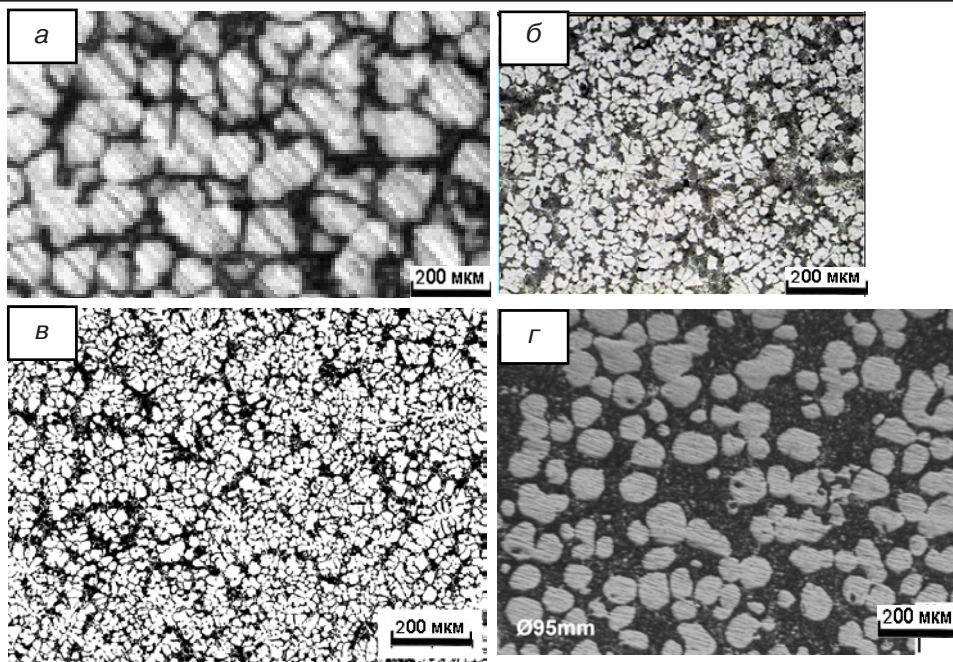


Рис. 4. Морфология образцов, получаемых с помощью охлаждающего уклона; данные из работ: а – [13]; б – [15]; в – [16]; г – [17]

Характерные микроструктуры приведены на рис. 4. Как видно из рисунка, для данной группы методов были получены как глобулярные рис. 4, а, г, так и розеточные морфологии, рис. 4, б, в. Здесь следует отметить, что у розеточных структур размеры меньше, чем у глобулярных (соответственно 50-100 и 100-200 мкм), а также они обладали некоторыми дендритными признаками.

Структуры, формирующиеся при других методах воздействия на заливаемый расплав (без охлаждающего уклона), представлены на рис. 5, а (стакан для сларри мультиплексного типа) и б (метод смешения двух струй). Если сопоставить между собой эти розеточные морфологии, то складывается впечатление, что во втором случае структура в несколько раз мельче – 200-250 и 50-100 мкм соответственно. Однако, если увеличить рис. 5, б в 2,5 раза, то в результате (рис. 5, г) можно увидеть морфологию, абсолютно идентичную наблюдаемой на рис. 5, а (отмечено белыми кругами). Остается неясным, является ли такое различие в размерах следствием различных механизмов формирования ростовых структур или же «техническими» проблемами, связанными с ошибками в увеличении рисунков непосредственно в тексте первоисточников. Скорее всего имеет место последняя причина, поскольку, как уже отмечалось ранее, изменение размера структурных элементов приводит не просто к изменению масштаба, но и сопровождается изменением характера структуры – от розеточной к глобулярной или наоборот.

Методы с воздействием на расплав внутри формы

Методы с воздействием на расплав внутри формы в основном основаны на слабом электромагнитном перемешивании заливаемого расплава [21-24]. Основные параметры таких методов приведены в табл. 3.

Как видно из таблицы, температура заливки, температура формы и параметры формы в основном не отличаются как между собой, так и от соответствующих значений для чисто заливочных методов (см. табл. 1) и методов с использованием охлаждающего уклона (см. табл. 2). Исходя из этого, диапазон этих параметров можно охарактеризовать следующим образом: цилиндрическая стальная форма \varnothing 40-120 мм, высотой 70-350 мм с толщиной стенки 1-2 мм комнатной температуры.

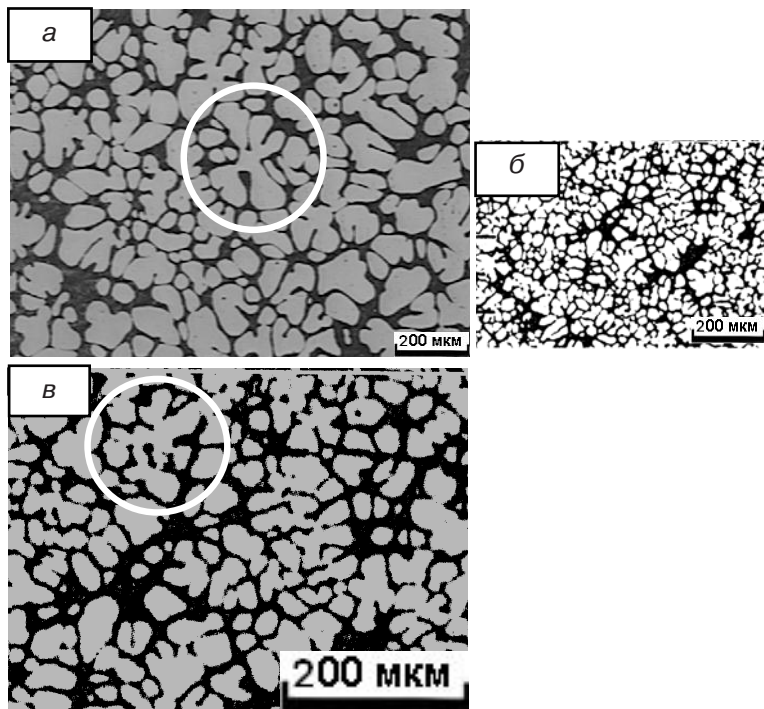


Рис. 5. Морфология образцов, получаемых с воздействием на заливаемый расплав: а – стакан для сларри мультиплексного типа; б – метод смешения двух струй; в – увеличенная структура, показанная на рисунке б

Таблица 3. Основные параметры методов [21-24]

| Источник | Сплав | $T_{зад},$ °C | $T_{фор},$ °C | Форма цилиндр, описание | Время перемешива- ния, с | Мощность, Вт |
|----------|---------|------------------|------------------|---------------------------------------|--------------------------------|-----------------|
| [21] | А356 | 630 | 20 | сталь Ø127 мм, высота 220 мм | 8 | 366 |
| [22] | Al-7%Si | 630 | 20 | графит Ø 60 мм, высота 150 мм | 2 | 540 |
| [23] | А356 | 630 | 20 | сталь Ø 80 мм, высота 150 мм | 6 | 440 |
| [24] | Al-7%Si | 630 | 20 | Ø 50 мм, высота 70 мм, стенка 2 мм | нет данных | нет данных |

Что касается перемешивания в форме, то мощность перемешивания, (которая характеризуется авторами как «слабая»), так же как и длительность перемешивания, отличались между собой незначительно (см. табл. 3). Интересно отметить использование графитовой формы в работе [22] – несмотря на отличающиеся от

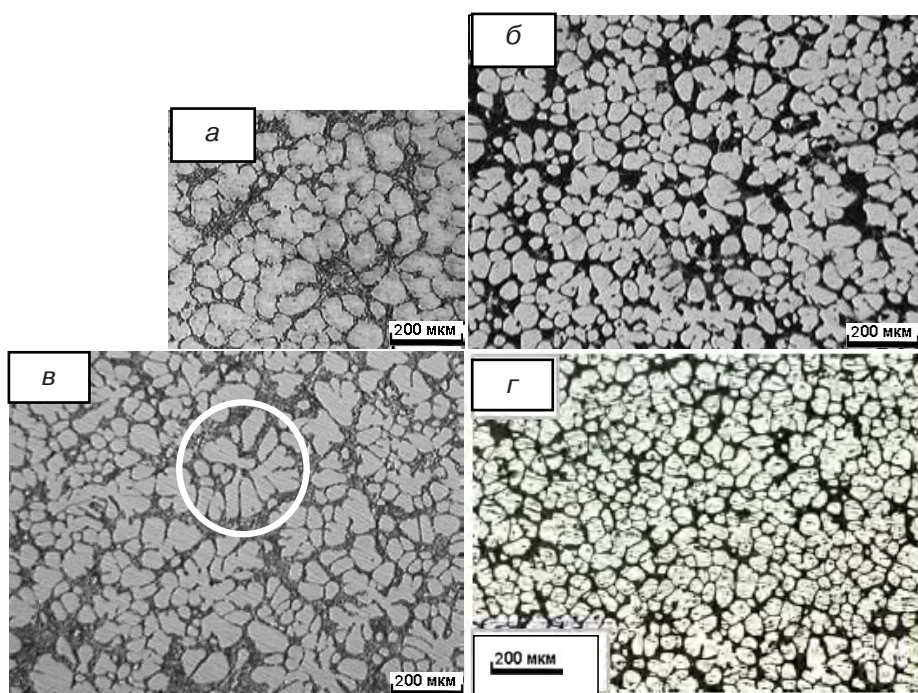


Рис. 6. Морфология образцов, получаемых со слабым электромагнитным перемешиванием; данные из работ: а – [21]; б – [22]; в – [23]; г – [24]

стали теплофизические свойства, была получена структура практически аналогичная полученной для стальных форм (рис. 6).

На рис. 6 приведены полученные структуры, которые характеризуются авторами как розеточная (рис. 6, в – розетка отмечена белым кругом), глобулярная с небольшой долей розеток (рис. 6, б) и глобулярная (рис. 6, а, г). Как видно из рисунка, наиболее мелкая структура наблюдается на рис. 6, г. Сопоставление данных таблицы показывает, что этот случай отличался минимальным размером полости формы.

Выводы

Проведенный анализ показал, что задача однозначно выделить наиболее перспективный для малого производства метод реолитья, не может быть решена на основании результатов существующих исследований. Во-первых, на основании проведенного анализа складывается впечатление, что в рамках наиболее простых и дешевых чисто «заливочных» методов получаемые образцы имели розеточную структуру и таким образом вопрос о возможности получения глобулярной структуры с помощью этих методов остается открытым. Что касается несколько более сложных методов воздействия на расплав внутри формы и методов с воздействием на заливаемый расплав, то имеет место противоречивость полученных результатов – если в первом случае розеточные структуры были крупнее глобулярных, то во втором случае – наоборот. Такая ситуация не вписывается в развиваемые авторами методы представления о том, что недендритные структуры являются следствием интенсификации массового роста кристаллов, которая вызывается массовым зарождением вследствие движения потока расплава вдоль охлаждающей поверхности или стенок формы. Если исходить из этого, то налагаемые воздействия должны действовать «в одну сторону» независимо от того, каким конкретно методом эта интенсификация достигнута. Таким образом представляется возможным заключить, что решение этой проблемы требует дальнейших системных исследований.



Список литературы

1. Семенов Б. И., Куштаров К. М. Некоторые итоги промышленного освоения технологий рео- и тиксолитья //Металлургия машиностроения. – 2003. – № 6. – С. 32-37.
2. Hallstedt B., Balitchev E., Shimahara H. Semi-solid processing of alloys: principles, their modynamic selection criteria, applicability // ISIJ International. – 2006. – Vol. 46, № 12. – P. 1852-1857.
3. International Materials Reviews //Semisolid metal processing. – 2002. – Vol. 47. – № 2. – P. 1-37.
4. Continuous Fabrication of Sound Semi-solid Slurry for Rheoforming Hongmin GUO and Xiangjie YANG // Solid State Phenomena Vols. – 2006. – P. 425-428.
5. Rice C. S., Mendes R. F. Slurry based semi-solid casting. Advanced materials and processing. – 2001. – № 10. – P. 49-52.
6. Direct thermal method: new process for development of globular alloy microstructure / D. J. Brown, M. J. Hussey, A. J. Carr, D. Brabazon // International journal of cast metals research. – 2003. – Vol. 16. – P. 418-426.
7. Quick Semi-Solid Slurry Making Method Using Metallic Cup / F. Pahlevani, K. Anzai, E. Niyama et. el. // Solid State Phenomena. – 2008. – Vol. 141-143. – P. 463-468.
8. Modeling of in-ladle direct thermal control rheocasting process / Jin-Kyu Lee, Shae K. Kim et. el. // Materials Science and EGINEERING. – 2007. – A. 449-451. – P. 680-683.
9. Optimization of Manufacturing Conditions of Semi-Solid Slurry in Multiplex-Type Slurry Cup / Suk-Won Kang, Dock-Young Lee, Ki-Bae Kim et. el. // Solid State Phenomena. – 2006. – Vol. 116-117. – P. 243-246.
10. Effects of melt thermal treatment on A356 alloy / J. Wang, S. He, B. Sun, Y. Zhou // Journal Material Science Technology. – 2003. – Vol. 19. – № 2. – P. 152-154.
11. The continuous rheoconversion process (crptm): optimization & industrial applications / Q. Y. Pan, D. Apelian, P. Hogan // Metallurgical Science and Technology. – 2007. – Vol. 24. – № 2. – P. 9-18.
12. Cooling slope casting to obtain thixotropic feedstock / E. C. Legoretta, H. V. Atkinson, H. Jones et. el. // Solidification Processing 07 – Proceedings of the 5th Decennial International Conference on Solidification Processing, 23-25 July, Sheffield, UK. – P. 582-586.
13. Microstructure evolution of A356 aluminum alloy produced by cooling slope method /S. Nourouzil, S. M. Ghavamodini, H. Baseril, et.el. //Advanced Materials Research. – 2012. – Vol. 402. – P. 272-276.
14. Fabrication of Refined Isometric Crystals of Semi-Solid Al7Si2RE Alloy / X. Shikun, Y. Rongxi, Z. Xiaoqiu, et. el. // Applied Mechanics and Materials. – 2010. – Vol. 33. – P. 304-308.
15. The Effects of Cooling Slope Casting and Isothermal Treatment on Wear Behavior of A380 Alloy N. Saklakoglu, S. Gencalp, S. Kasman // Advanced Materials Research. – 2011. – Vol. 264-265. – P. 42-47.
16. Microstructural Evolution of ETIAL 160 Aluminium Alloy Feedstock Produced by Cooling Slope Casting / N. Saklakoglu, Y. Birol, S. Kasman // Solid State Phenomena. – 2008. – Vol. 141-143. – P. 575-580.
17. Optimization of the Microstructural Evolution of Al-8%Si in Cooling Slope Device / B. I. Semenov, K. M. Kushtarov, J. H. Song, T. S. Ha // Solid State Phenomena. – 2006. – Vol. 116-117. – P. 754-757.
18. Preparation of Semi-Solid AM60 Alloy by Novel Self-Inoculation Method / Y. Li, B. Xing, Y. Ma, T. J. Chen, Y. Hao // Advanced Materials Research. – 2011. – Vol. 189-193. – P. 3804-3809.
19. Cooling by The Sine Function to Produced Semi-solid Aluminum Alloys // Z. Songyang, G. Xiaoqin, L. Changhong, L. Sizhong, Z. Ying // Advanced Materials Research. – 2011. – Vol. 146-147. – P. 1788-1791.
20. Preparing semisolid light alloys by vibrating wavelike sloping plate process and thixoforming / R. Guan, Z. Xing, L. Shi, C. Wang, Y. Wang // Materials Science Forum. – 2007. – Vol. 561-565. – P. 865-868.
21. Effects of Electromagnetic Stirring on Morphology Evolution of Primary Phase in Semisolid Alloy Zheng Luya, Xiao-mei Liub // Advanced Materials Research. – 2012. – Vol. 399-401. – P. 1712-1716.
22. Mao W., Bai Y, Tang G. Preparation of semi-solid aluminum alloy slurry under weak electromagnetic stirring conditions // J. Mater. Sci. Technology. – 2006. – Vol. 22. – № 4. – P. 447-451.
23. Tang G., Mao W., Liu Y. Preparation of semisolid A356 Al alloy slurry by low superheat pouring