

Перспективные методы реолитья для малотоннажного производства

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.

Введение. Анализ мирового опыта разработки и освоения производства отливок из жидко-твердых 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 промышленно выпускаются машины, например, 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 жидко-твердого состояния с получением первичной фазы с недендритной морфологией обязательной стадией имеют перемешивание расплава (принудительное или естественное) 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 он 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) двухшнековой 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, после достижения нужного количества твердой фазы необходимая порция расплава извлекается из устройства для применения.

К таким методам, например, относится «прямой метод формирования жидко-твердого состояния» [5]. При этом заполнение устройства перегретым расплавом является чисто техническим моментом, и происходящие при этом процессы не являются стадией возникновения и формирования в расплаве твердой фазы.

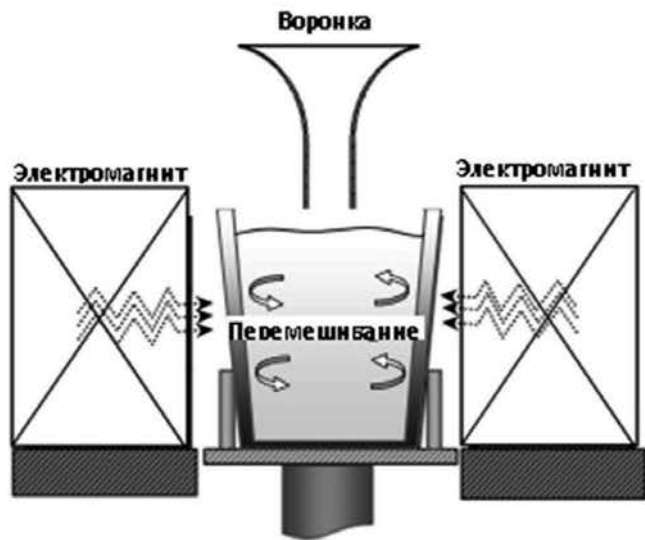
К третьей группе можно отнести технологии, в которых заполнение устройства (металлического кокиля) слабо перегретым расплавом является ключевым моментом, перемешивание расплава в процессе заливки и теплообмен между расплавом и стенками кокиля в процессе его заполнения являются определяющими для формирования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

С точки зрения практического применения технологии, относящиеся к первой и второй группам, требуют сложного специализированного оборудования и ориентированы на крупное промышленное производство литых алюминиевых изделий, которое в Украине отсутствует. В связи с этим, по крайней мере, в ближайшей перспективе, разработка таких отечественных технологий представляется нецелесообразной.

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 жидко-твердых 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 применены для выпуска небольших серий изделий. В качестве примера, на рис. 1 приведены схемы некоторых технологий из этой группы, которые подробно описаны в следующих разделах.

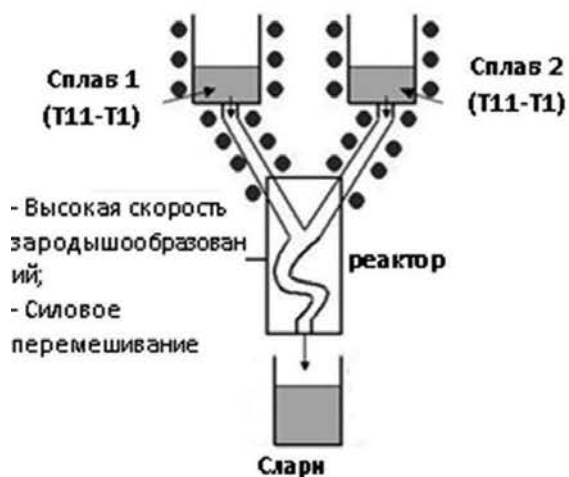
Преимущества такого подхода, в рамках которого сплав с недендритной морфологией в жидко-твердом состоянии (сларри) формируется в металлической емкости, являются: а) универсальность – в процессе охлаждения расплав в частично закристаллизованном состоянии может быть использован для реолитья, а после полного затвердевания представляет



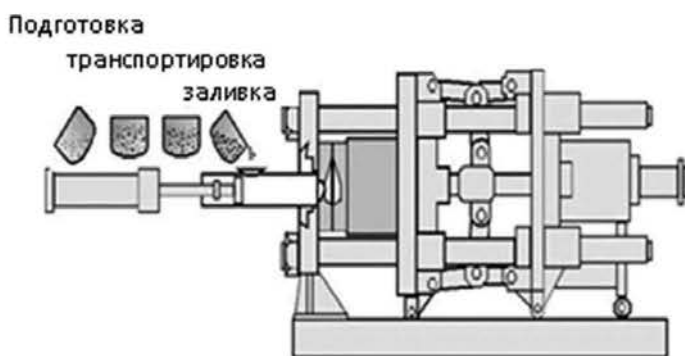
а



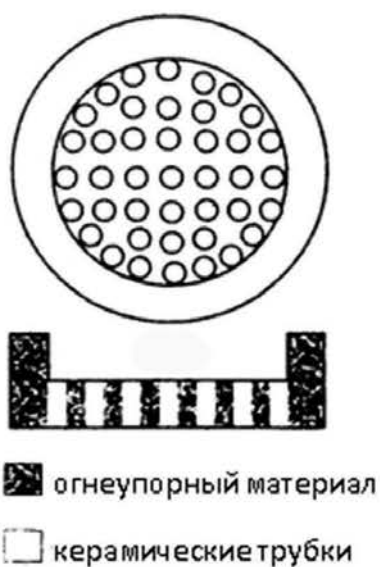
б



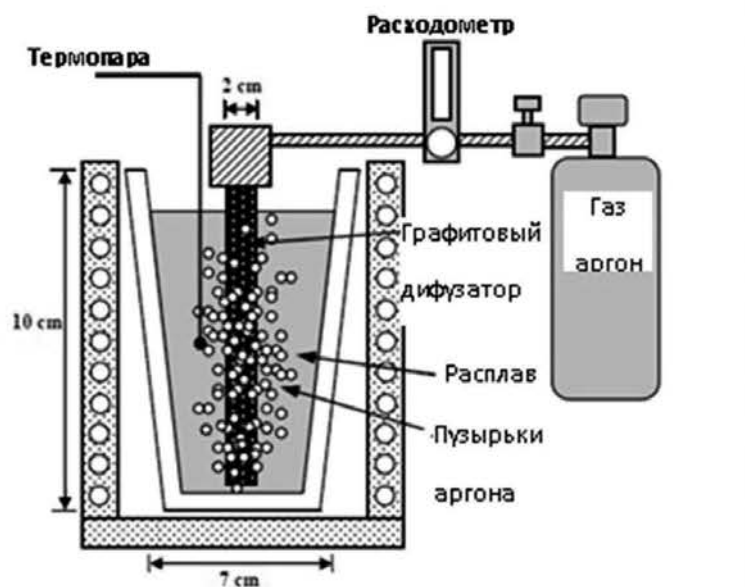
в



г



д



е

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 жидко-твердый процесс

собой заготовку для тиксолитья; б) 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 и 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.

2. Описание методов. Далее в настоящей статье представлен обзор технологических подходов, перспективных для малых производств – относящихся к третьей группе, а также тех комбинированных методов, практическая реализация которых не требует больших капиталовложений.

2.1 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 специально 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 имеет место медленный рост и глобуляризация ростовой структуры.

По данному методу сплав А356 (аналог АК7) при температуре 640 °С заливался в цилиндрическую форму из малоуглеродистой стали (диаметр полости – 53 мм, толщина стенки – 1 мм) комнатной температуры. Полученная морфология кристаллов первичного алюминия в жидко-твердом 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 охлаждается, 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 – полукупол, материал – углеродистая сталь, емкость – 1500 гр., 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 А356 с температурой 670 °С заливался 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.

2.2 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 диамет-

тром 6 мм, через которые расплав протекал в форму. Температура заливки – 630 °С, температура формы – 250 °С. Метод был опробован (с получением недендритной структуры) для сплава А356.

Метод смешения двух струй [10] отличается от упомянутого выше тем, что в крышке отверстия просверлены по всей ее площади, и на крышку одновременно заливаются два расплава сплава А356 – с температурой 600 и 950 °С. Температура формы – 220 °С.

Процесс непрерывного рео-преобразования [11] (Continuous rheoconversion process) также предусматривает смешение двух струй расплава, которое происходит 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 проводили на сплаве А356.

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 металлическая плита, металлический желоб или металлический 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 А356, 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 использовалась водоохлаждаемая медная плита длиной 700 мм и толщиной 15 мм, покрытая тонким слоем оксида циркония. Угол наклона плиты – 50°. Заливка осуществлялась в цилиндрический стальной стакан диаметром 80 мм и глубиной 200 мм. Исследовались различные температуры заливки (625, 650 и 680 °С) и стакана (25, 200 и 400 °С). Наиболее мелкая недендритная структура формировалась, как и в предыдущем случае, при температуре заливки 620 °С и комнатной температуре стакана. Исследовался тот же сплав А356. Интересно 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 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 А380 недендритная структура была получена при заливке 615–630 °С. Весьма сходная методика описана в работе [16], где сплав AlSi8Cu3Fe с минимальным пере-

гревом над ликвидусом (при 605–615 °С) выливался на желоб из мягкой стали, покрытый нитридом бора. Длина желоба – 300 мм, наклон – 60°. Желоб был водоохлаждаемым. Заливка осуществлялась 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] была получена недендритная структура для магниевого сплава АМ 60 при использовании такой трубки, причем верхняя ее часть была разделена перегородкой, при этом создавались два потока, которые в нижней части трубки сливались в один. Угол наклона составлял 45°. Аналогичные результаты были получены в работе [19], где для сплава алюминий – медь использовалась водоохлаждаемая трубка, 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, и к нему прикладывалась вибрация с амплитудой 2 мм.

2.3 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 А356, который заливался при температуре 630 °С в цилиндрическую форму из нержавеющей стали диаметром 127 мм 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 мм и высотой 150 мм. Температура заливки составляла 630 °С, в процессе заливки расплав подвергался перемешиванию электромагнитным полем 0,54 кВт в течение 2 с, а также в работе [23], для сплава А 356, который заливался в цилиндрическую форму из нержавеющей стали диаметром 80 мм и глубиной 150 мм. Заливка осуществлялась 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) заливался в контейнер для приготовления сларри, где остывал

при воздействии магнитного поля. Контейнер имел диаметр 50 мм 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 воздействие на расплав в контейнере для формирования сларри. Использовался сплав Al-8%Si-3%Cu (ADC10), тигель из нержавеющей стали, диаметром 50 мм и высотой 100 мм, его внутренняя поверхность была покрыта нитридом бора. Воронка имела коническую форму. Температура заливки 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 жидко-твердый 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. Применялся цилиндрический тигель из нержавеющей стали, покрытый изнутри нитридом бора, в него помещалась навеска сплава А356 массой 600 г. Тигель с навеской нагревался в печи, после расплавления тигель вынимался и остывал на воздухе. При достижении температуры 625 °С в расплав погружался графитовый диффузор, подсоединенный к баллону со сжатым аргонном,

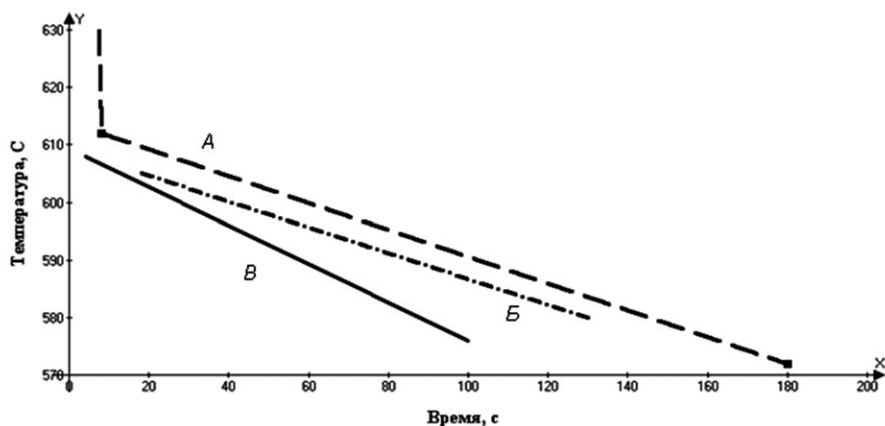


Рис. 2. Температурные кривые для чисто заливочных методов: кривая А – прямой термический контроль в ковше; кривая Б – прямой термический метод; кривая В – метод литья в стакан

и включалась продувка газом (расход 2 литра/мин), которая продолжалась до достижения доли твердой фазы 10 %, после чего диффузор вынимался. Быстрый теплоотвод из расплава осуществлялся на поверхности диффузора аналогично теплоотводу через стенки холодной формы при заливке, а движение пузырьков газа создавало потоки, аналогичные возникающим при заполнении формы.

3. Обсуждение и сравнение. В попытке сопоставить между собой различные методы в данном разделе рассматриваются только те работы, которые были выполнены для сплава А356 или близкие к нему по составу.

3.1 Чисто заливочные методы

Во всех работах, посвященных чисто заливочным методам [6–8], отмечается, что причиной формирования недендритной структуры, является быстрое установление баланса температур расплава и формы после заливки и последующее относительно медленное охлаждение. Соответствующие термограммы схематически приведены на рис. 2.

Следует отметить, что из-за инерционности термомпар при низкой температуре заливки зафиксировать стадию быстрого начального охлаждения не удалось. Как видно из рис. 2, 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, не во всех публикациях использовавшиеся устройства описаны детально. Соответственно в этой и последующих таблицах дан-

Таблица 1

Основные параметры заливочных методов

Метод	Сплав	T заливки, °С	T формы, °С	Форма, цилиндр, описание
Прямой термический метод [6]	A356	640	20	малоуглеродистая сталь, диаметр полости – 53 мм, толщина стенки 1 – мм
Метод литья в стакан [7]	A356	620	20	углеродистая сталь, емкость 1,5 кг
Прямой термический контроль в ковше [8]	A356	670	500	материал с теплопроводностью 0,057 кал/см ²

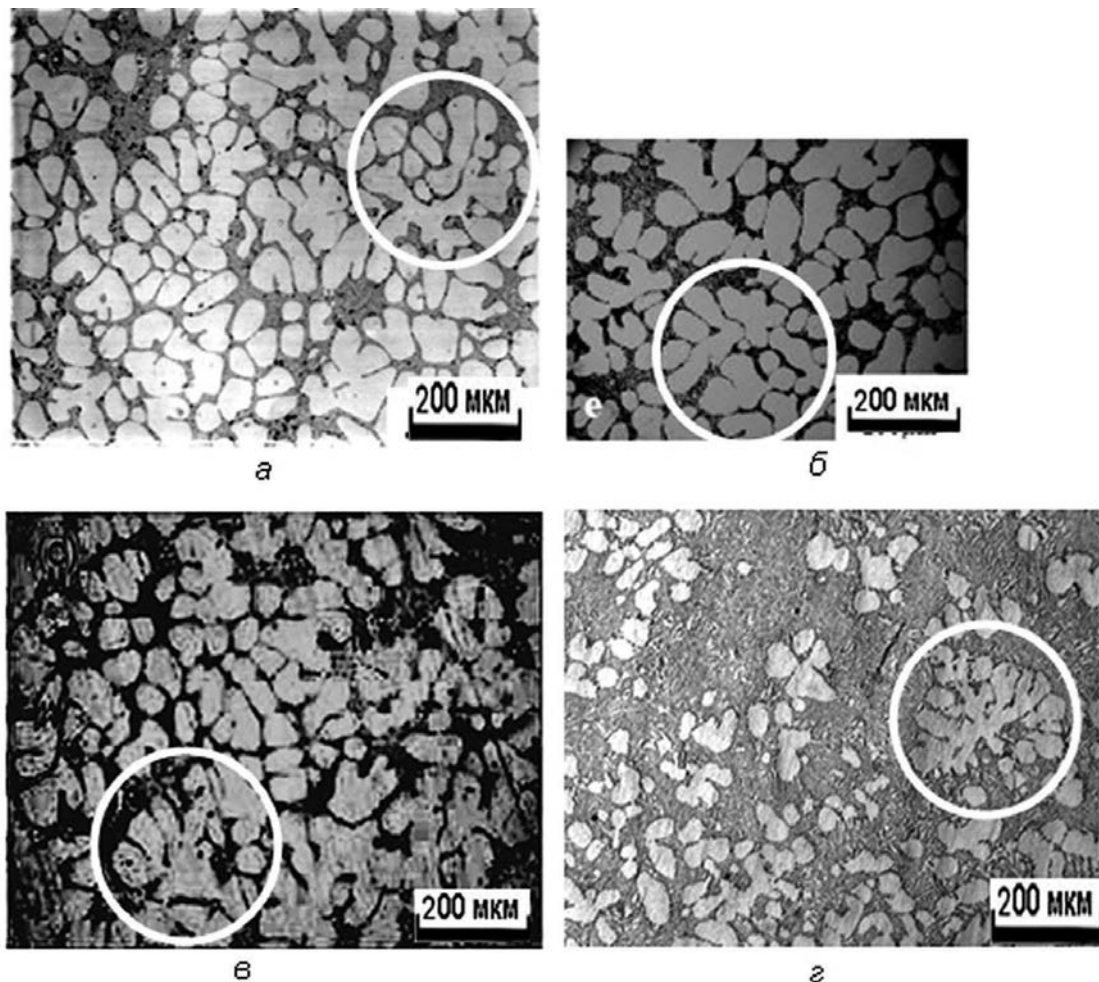


Рис. 3. Морфология образцов, получаемых чисто заливочными методами: *а* – прямой термический метод; *б* – метод литья в стакан; *в* – прямой термический контроль в ковше; *г* – данные автора, заливка прямым термическим методом, сплав Al – 10,2 мас.% Si

ные приведены в таком виде, в котором они были изложены в первоисточниках.

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 касается метода прямого термического контроля в ковше, 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 наших 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.

Следует отметить, что авторы характеризуют такие структуры как «глобулярные» с размером 100 мкм (рис. 3, *а*) и 50 мкм (рис. 3, *б*), структуру (рис. 3, *в*) авторы не характеризовали. По мнению автора статьи, 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 заметным определенное сходство со структурами, выделенными на рис. 3 (*а–в*). Таким образом, представляется возможным предположить, что за отдельные глобулы принимались структурные элементы розеток (которые действительно имели такие видимые размеры), на самом деле в объеме составляющие единое целое (розетку с размером более 200 мкм).

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

3.2 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.

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

Параметры процессов для различных литературных источников

Источник	Метод охлаждающего уклона	Длина, мм	наклон, °	T заливки на уклон, °С	Форма, цилиндр, описание	Сплав
[12]	Водоохлаждаемая плита, мягкая сталь, покрыта нитридом бора	250	60	620	нержавеющая сталь, Ø40 мм, высота 70 мм	A356
[13]	Водоохлаждаемая медная плита, покрыта оксидом циркония, толщина 15 мм	700	50	620	сталь, Ø80 мм, глубина 200 мм	A356
[15]	Желоб из мягкой стали, покрыт нитридом бора	350	60	615–630	–	A380
[16]	Желоб из мягкой стали, покрытый нитридом бора	300	60	605–615	Ø30 мм, глубина 150 мм	AlSi8Cu3Fe
[17]	Водоохлаждаемый желоб	–	30	перегрев 30 °С	сталь, Ø95 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-%)

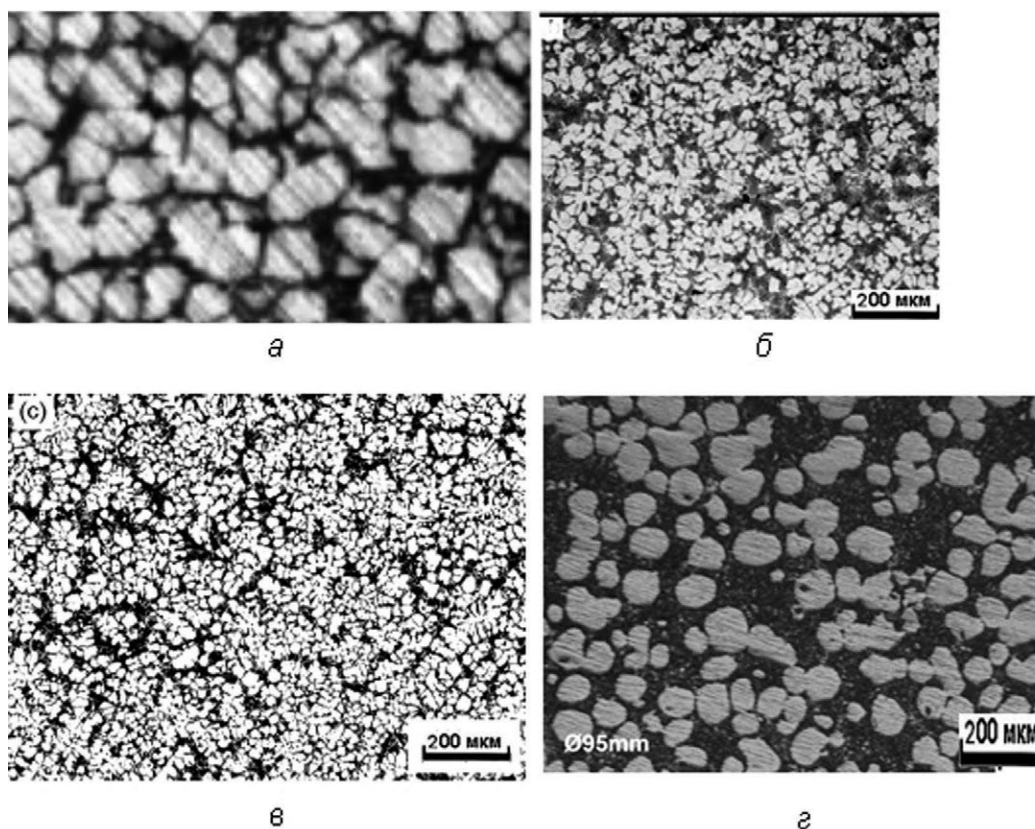


Рис. 4. Морфология образцов, получаемых с помощью охлаждающего уклона. Данные из работ: а – [13]; б – [15]; в – [16]; з – [17]

следует отметить, что розеточные структуры имели размеры меньше, чем глобулярные (соответственно 50–100 и 100–200 мкм), а также 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 рис. 5, 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 мкм и 50–100 мкм, соответственно. Однако если увеличить рис. 5, б в 2,5 раза, то в результате (рис. 5, з) 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

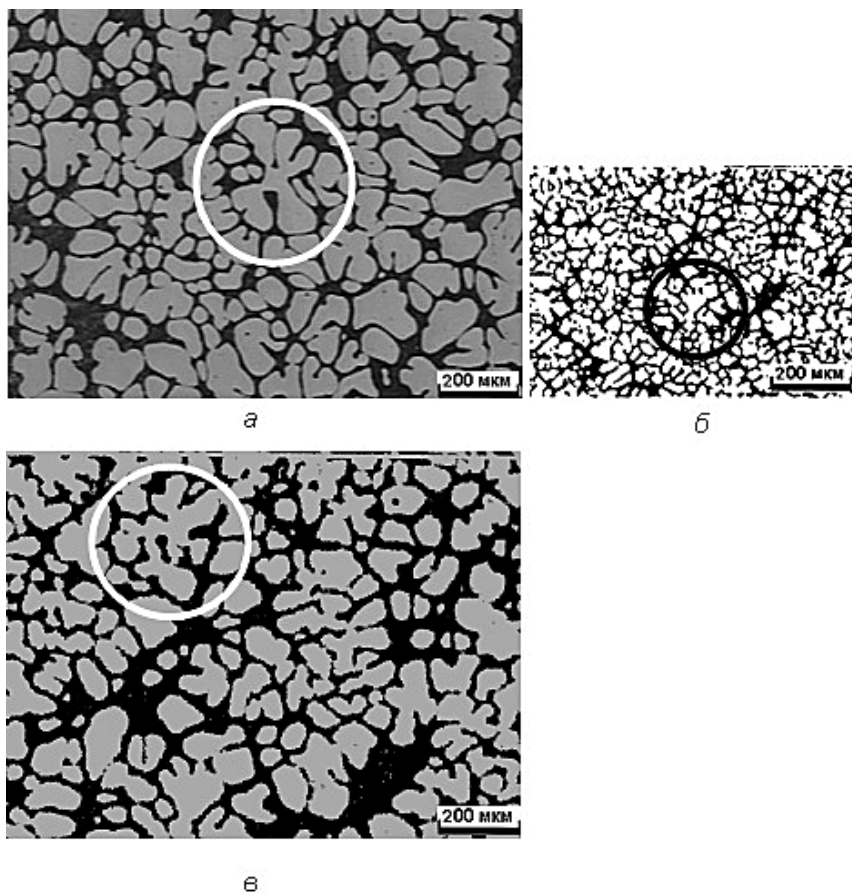


Рис. 5. Морфология образцов, получаемых с воздействием на заливаемый расплав: а – стакан для сларри мультиплексного типа; б – метод смешения двух струй; в – увеличенная структура, показанная на рис. б

ранее, изменение размера структурных элементов приводит не просто к изменению масштаба, но сопровождается изменением характера структуры, от розеточной к глобулярной или наоборот.

3.3 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 табл. 3, температуры заливки, температуры 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 укло-

на (см. табл. 2). Исходя из этого, диапазон этих параметров можно охарактеризовать следующим образом – цилиндрическая стальная форма диаметром 40–120 мм, высотой 70–350 мм с толщиной стенки 1–2 мм комнатной температуры.

Что касается перемешивания в форме, то мощность перемешивания, (которая характеризуется авторами как «слабая»), также как и длительность перемешивания, отличались между собой незначительно (см. табл. 3). Интересно отметить использование графитовой формы в [22] – несмотря на отличающиеся от стали теплофизические свойства, структура была получена практически аналогичная полученной для стальных форм (см. 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, з). Как видно из рисунка, наиболее мелкая структура наблюдается на рис. 6, з. Сопоставление данных таблицы показывает, что этот случай отличался минимальным размером полости формы.

4. Заключение

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

Таблица 3

Параметры методов с воздействием на расплав внутри формы

Источник	Сплав	$T_{зал.},$ °C	$T_{фор.},$ °C	Форма цилиндр, описание	Время перемеш., с	Мощность, Вт
[21]	A356	630	20	сталь Ø127 мм, выс. 220 мм	8	366
[22]	Al-7%Si	630	20	графит Ø60 мм, выс. 150 мм	2	540
[23]	A356	630	20	сталь Ø80 мм, выс. 150 мм	6	440
[24]	Al-7%Si	630	20	Ø50 мм, выс 70 мм, стенка 2 мм	нет данных	нет данных

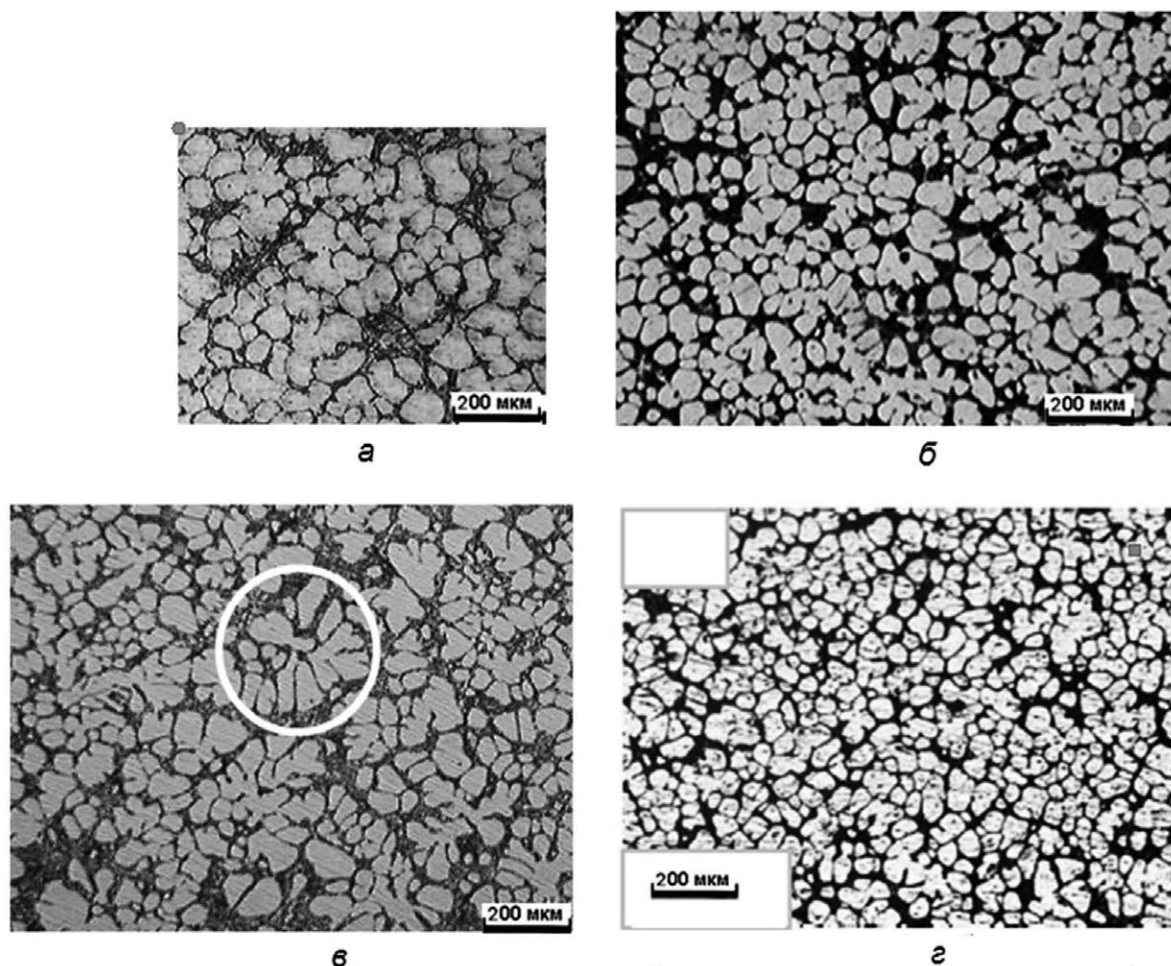
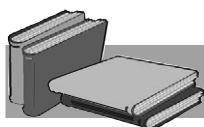


Рис. 6. Морфология образцов, получаемых со слабым электромагнитным перемешиванием. Данные из работ: а – [21]; б – [22]; в – [23]; г – [24]

полученных результатов – если в первом случае розеточные структуры были крупнее глобулярных, то во втором случае – наоборот. Такая ситуация не вписывается в развиваемые авторами методов 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.



REFERENCES

1. *Semenov, B.I., Kushtarov, K.M.* (2003). Some summation of industrial employment of rheo- and thixocasting technologies [Nekotorye itogi promyshlennogo osvoenia tekhnologii reo- i tiksolit'ia]. *Metallurgiya mashinostroeniia*, no. 6, pp. 32–37 [in Russian].
2. *Hallstedt, B., Balitchev, E., Shimahara, H.* (2006). Semi-solid processing of alloys: principles, thermodynamic selection criteria, applicability. *ISIJ International*, vol. 46, no. 12, pp. 1852–1857 [in English].
3. *Fan, Z.* (2002). Semisolid metal processing. *International Materials Reviews*, vol. 47, no. 2, pp. 1–37 [in English].
4. *Guo, H.M., Yang, X.J.* (2006). Continuous Fabrication of Sound Semi-solid Slurry for Rheoforming. *Solid State Phenomena*, vols. 116–117, pp. 425–428 [in English].
5. *Rice, C.S., Mendes, R.F.* (2001). Slurry based semi-solid casting. *Advanced materials and processing*, October, pp. 49–52 [in English].
6. *Brown, D.J., Hussey, M.J., Carr, A.J., Brabazon, D.* (2003). Direct thermal method: new process for development of globular alloy microstructure. *International journal of cast metals research*, vol. 16, pp. 418–426 [in English].
7. *Pahlevani, F., Anzai, K., Niyama, E.* (2008). Quick Semi-Solid Slurry Making Method Using Metallic Cup. *Solid State Phenomena*, vols. 141–143, pp. 463–468 [in English].

8. Jin-Kyu Lee, Shae K. Kim (2007). Modeling of in-ladle direct thermal control rheocasting process. *Materials Science and Engineering A* 449–451, pp. 680–683 [in English].
9. Suk-Won Kang, Dock-Young Lee, Ki-Bae Kim (2006). Optimization of Manufacturing Conditions of Semi-Solid Slurry in Multiplex-Type Slurry Cup. *Solid State Phenomena*, vols. 116–117, pp. 243–246 [in English].
10. Wang, J., He, S., Sun, B., Zhou, Y. (2003). Effects of melt thermal treatment on A356 alloy. *Journal Material Science Technology*, vol. 19, no 2, pp. 152–154 [in English].
11. Pan, Q.Y., Apelian, D., Hogan, P. (2007). The continuous rheoconversion process (crptm): optimization & industrial applications. *Metallurgical Science and Technology*, vol. 24, no. 2, pp. 9–18 [in English].
12. Legoretta, E.C., Atkinson, H.V., Jones, H. Cooling slope casting to obtain thixotropic feedstock. Solidification Processing 07. Proceedings of the 5th Decennial International Conference on Solidification Processing, 23-25 July, Sheffield, UK, pp. 582–586 [in English].
13. Nourouzi, S., Ghavamodini, S.M., Baseri, H., Kolahdooz, A., Botkan, M. (2012). Microstructure evolution of A356 aluminum alloy produced by cooling slope method. *Advanced Materials Research*, vol. 402, pp. 272–276 [in English].
14. Shikun, X., Rongxi, Y., Xiaoqi, Z., Zhi, G., Xiang, X. (2010). Fabrication of Refined Isometric Crystals of Semi-Solid Al7Si2RE Alloy. *Applied Mechanics and Materials*, vol. 33, pp. 304–308 [in English].
15. Saklakoglu, N., Gencalp, S., Kasmanl, S. (2011). The Effects of Cooling Slope Casting and Isothermal Treatment on Wear Behavior of A380 Alloy. *Advanced Materials Research*, vols. 264–265, pp. 42–47 [in English].
16. Saklakoğlu, N., Birol, Y., Kasman, S. (2008). Microstructural Evolution of ETIAL 160 Aluminium Alloy Feedstock Produced by Cooling Slope Casting. *Solid State Phenomena*, vols. 141–143, pp. 575–580 [in English].
17. Semenov, B.I., Kuschtarov, K.M., Song, J.H., Ha, T.S. (2006). Optimization of the Microstructural Evolution of Al-8%Si in Cooling Slope Device. *Solid State Phenomena*, vols. 116–117, pp. 754–757 [in English].
18. Li, Y., Xing, B., Ma, Y., Chen, T.J., Hao, Y. (2011). Preparation of Semi-Solid AM60 Alloy by Novel Self-Inoculation Method. *Advanced Materials Research*, vols. 189–193, pp. 3804–3809 [in English].
19. Songyang, Z., Xiaoqin, G., Changhong, L., Sizhong, L., Ying, Z. (2011). Cooling by The Sine Function to Produced Semi-solid Aluminum Alloys. *Advanced Materials Research*, vols. 146–147, pp. 1788–1791 [in English].
20. Guan, R., Xing, Z., Shi, L., Wang, C., Wang, Y. (2007). Preparing semisolid light alloys by vibrating wavelike sloping plate process and thixoforming. *Materials Science Forum*, vols. 561–565, pp. 865–868 [in English].
21. Zheng Lina, Xiao-mei Liub (2012). Effects of Electromagnetic Stirring on Morphology Evolution of Primary Phase in Semisolid Alloy. *Advanced Materials Research*, vols. 399–401, pp. 1712–1716 [in English].
22. Mao, W., Bai, Y., Tang, G. (2006). Preparation of semi-solid aluminum alloy slurry under weak electromagnetic stirring conditions. *J. Mater. Sci. Technology*, vol. 22, no. 4, pp. 447–451 [in English].
23. Tang, G., Mao, W., Liu, Y. (2011). Preparation of semisolid A356 Al alloy slurry by low superheat pouring and weak traveling-wave electromagnetic stirring. *Advanced Materials Research*, vols. 311–313, pp. 707–711 [in English].
24. Hong, C.P., Kim, J.M. (2006). Development of an Advanced Rheocasting Process and its Applications. *Solid State Phenomena*, vols. 116–117, pp. 44–53 [in English].
25. Sim, J.G., Choi, B.H., Yang, Y.S., Kim, J.M., Hong, C.P. (2010). Development of a nucleation accelerated semisolid slurry making method and its application to rheo-diecasting of ADC10 alloy. *ISIJ International*, vol. 50, no. 8, pp. 1165–1174 [in English].
26. Doutre, D., Hay, G., Wales, P., Gabathuler, J.-P. (2004). SEED: a new process for semi-solid forming. *Canadian Metallurgical Quarterly*, vol. 43, no. 2, pp. 265–272 [in English].
27. Wannasin, J., Martinez, R.A., Flemings, M.C. (2006). A Novel Technique to Produce Metal Slurries for Semi-Solid Metal Processing. *Solid State Phenomena*, vols. 116–117, pp. 366–369 [in English].

Received 04.10.2018

Анотація

А.Г. Борисов, канд. фіз.-мат. наук, ст. наук. співр.,
e-mail: wwwrogneda@ukr.net

*Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України,
Київ, Україна*

Перспективні методи реолиття для малотонажного виробництва

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

Ключові слова

Реолиття, низькотемпературна заливка, потік розплаву, морфологія.

Summary

A.G. Borisov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, e-mail: wwwrogneda@ukr.net

Physico-technological Institute of Metals and Alloys of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Perspective methods of rheocasting for low-tonnage production

Review of modern methods of rheocasting is done. They were classified on the base of peculiarities of the melt motion. Methods that are promising for small production have been considered in detail.

Keywords

Rheocasting, low-temperature casting, melt flow, morphology.