

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ
АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА (НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)» (СГАУ)

Инновационные процессы литья, основанные на гибридных технологиях с воздействием электромагнитных источников

Электронный учебно-методический комплекс дисциплины
Работа выполнена по мероприятию блока 1 «Совершенствование образовательной деятельности» Программы развития СГАУ на 2009 – 2018 годы по проекту «Разработка магистерской программы и образовательных контентов «Структурирование сплавов до наноуровневого размера в металлургических циклах с применением инновационных технологий способов литья и обработки металлов давлением с воздействием электромагнитных источников» Соглашение № 1/11 от 03 июня 2013 г.

УДК 662.2.8
И 665

Автор-составитель: **Гречников Федор Васильевич**

Инновационные процессы литья, основанные на гибридных технологиях с воздействием электромагнитных источников [Электронный ресурс] : электрон. учеб.-метод. комплекс дисциплины / М-во образования и науки РФ. Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т); авт.-сост. Ф. В. Гречников. - Электрон. текстовые и граф. дан. - Самара, 2013. - 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

В состав учебно-методического комплекса входят:

1. Курс лекций.
2. Методические указания к лабораторным работам.
3. Заявка на патент.
4. Статья

УМКД «Инновационные процессы литья, основанные на гибридных технологиях с воздействием электромагнитных источников» предназначен для студентов инженерно-технологического факультета, обучающихся по направлению подготовки магистров 150400.68 «Металлургия» в В семестре.

УМКД разработан на кафедре обработки металлов давлением.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»
(СГАУ)

ИННОВАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ ЛИТЬЯ, ОСНОВАННЫЕ НА
ГИБРИДНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ С ВОЗДЕЙСТВИЕМ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИСТОЧНИКОВ

Электронный конспект лекций

Самара 2013

УДК 662.2.8
Г 815

Автор: **Гречников Федор Васильевич**

Гречников, Ф.В. Инновационные процессы литья, основанные на гибридных технологиях с воздействием электромагнитных источников [Электронный ресурс]: электрон. конспект лекций / Ф.В. Гречников; Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т) - Электрон. текстовые и граф. дан. (1,23 Мбайт). - Самара, 2013.

Приводятся классификация способов литья и специальные способы литья с физическим воздействием на расплав.

Лекции предназначены для студентов инженерно-технологического факультета, обучающихся по магистерской программе «Структурирование сплавов до наноуровневого размера в металлургических циклах с применением инновационных технологий способов литья и обработки металлов давлением с воздействием электромагнитных источников» по направлению подготовки 150400.68 «Металлургия», изучающих дисциплину «Инновационные процессы литья, основанные на гибридных технологиях с воздействием электромагнитных источников» в В семестре.

Подготовлено на кафедре обработки металлов давлением.

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2013

СОДЕРЖАНИЕ

1	Классификация способов литья.....	4
2	Специальные способы литья с физическим воздействием на расплав	31
2.1	Механические способы воздействия на расплав	32
2.2	Тепловые способы воздействия на расплав	33
2.3	Барометрические способы воздействия на расплав	34
2.4	Высокоэнергетические способы воздействия на расплав	36
2.5	Электромагнитные способы воздействия на расплав	38
2.6	Обработка расплава электромагнитными полями.....	40
2.7	Воздействие на расплав сильных магнитных полей	44
2.8	Воздействие на расплав слабых импульсов тока.....	50
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	56

1 Классификация способов литья

В основу классификации способов литья можно положить литейные формы, которые делятся на группы [1].

Первая группа — литье в разовые неразъемные литейные формы из дисперсных материалов с сохранением гравитационного метода заполнения формы сверху из ковша через литниковую систему, как в традиционном способе. Отличительной особенностью этих методов является использование разовой модели, которую для удаления из неразъемной формы разрушают каким-либо способом до заполнения формы расплавом или даже в процессе заполнения формы. В эту группу входят методы литья по выплавляемым, выжигаемым, растворимым, газифицируемым моделям. Наиболее распространенным в настоящее время в этой группе является литье по выплавляемым моделям, а новым и развивающимся процессом — литье с использованием моделей из фотополимерных материалов.

Вторая группа — литье в полупостоянные или постоянные разъемные формы с сохранением гравитационного метода заполнения формы сверху из ковша через литниковую систему. Общей характеристикой этих методов является разборная литейная форма, состоящая из полупостоянных или постоянных и разовых элементов. Конструкция формы должна позволять извлекать из нее отливку без повреждения многократно используемых элементов формы. Основным методом в данной группе — литье в кокиль. Известен также метод литья в углеродные (графитовые) формы. Могут, видимо, применяться и другие материалы для многократно используемых элементов литейной формы.

Характерными признаками **третьей группы** методов являются дополнительные воздействия на расплав при заполнении формы и затвердевании отливки. Тип и конструкция литейной формы определяются в этих случаях требованиями к отливкам и параметрами воздействия на

расплав и кристаллизующиеся отливки, главным образом, тонкостенные или отливки, сочетающие массивные и тонкие части. В числе этих требований следующие:

а) запрессовка металла в форму с высокими скоростями поршневой системой — литье под давлением. Этот способ предусматривает применение лишь металлических разъемных литейных форм (пресс-форм), не исключается применение стержней и формообразующих вставок из дисперсных огнеупорных материалов;

б) способы литья при регулируемом, относительно невысоком газовом давлении — литье под низким давлением, с противодавлением, вакуумным всасыванием и др. В этих способах можно использовать разъемные и неразъемные литейные формы из любых материалов, обладающих достаточными огнеупорностью и прочностью;

в) центробежное литье фасонных отливок также связано с возможностью использования разнообразных известных конструкций литейных форм. Однако при центробежном литье тел вращения (труб, втулок, гильз и др.) обычно применяются формы специальной конструкции — изложницы;

г) к способам, основанным на других принципах заполнения форм, относятся литье выжиманием, литье погружением форм в расплав и др.

Воздействия на заливаемый в форму расплав, отмеченные в пунктах а), б), в) и г), продолжаются и после заполнения формы, что способствует определенному повышению плотности отливок и улучшению качества их поверхности. Аналогично можно выделить методы, в которых наиболее значительно воздействие на расплав в период кристаллизации; их используют для получения особо плотных отливок и со специальной микроструктурой.

Четвертая группа - литье под всесторонним газовым давлением (автоклавное литье) с использованием литейных форм из различных материалов; литье с кристаллизацией под давлением (жидкая штамповка), в котором чаще всего используют металлические формы.

Пятая группа — методы литья, использующие воздействие на расплав, оказывающее существенное влияние на формирование микроструктуры отливок. В их числе методы с использованием электрического и электромагнитного воздействия на расплав до, во время или после поступления расплава в форму, обработка его ультразвуком и др.

Шестую группу образуют методы, основанные на формировании свойств отливок при непрерывных и полунепрерывных процессах литья. К этим процессам можно отнести: непрерывное литье с использованием стационарных и подвижных кристаллизаторов; литье вытягиванием из расплава и полунепрерывное литье, используемые для получения отливок постоянного профиля по длине; электрошлаковое литье; литье с последовательным заполнением; литье намораживанием и др. для получения фасонных отливок.

Седьмая группа — методы получения отливок с различными специальными свойствами, к которым можно отнести: армирование отливок; изготовление отливок из композиционных материалов и др.

Одним из наиболее распространенных методов является литье в кокиль. По конструкции различают кокили неразъемные вытряхные (рисунок 1.1, а) и разъемные с горизонтальным (рисунок 1.1, б) и вертикальным (рисунок 1.1, в) разъемами.

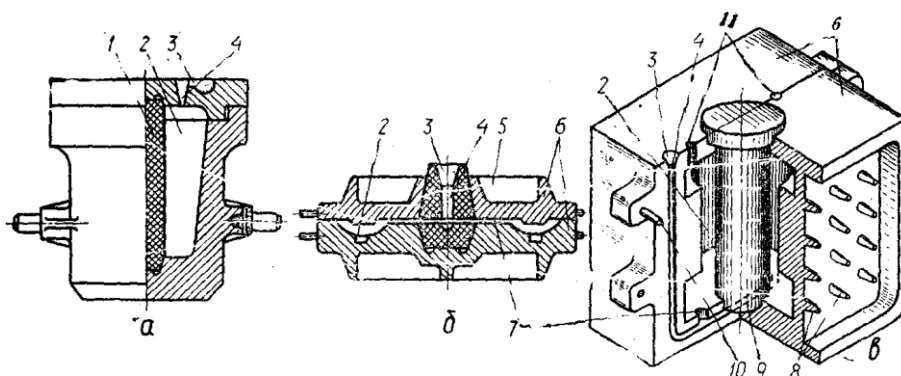


Рисунок 1.1 – Металлические формы (кокили)

Разъемные кокили состоят из двух половин 6, центрирующихся направляющими штырями 10. Чтобы избежать коробления, кокиль снабжают ребрами жесткости 5 либо делают коробчатой формы. На наружной стенке кокиля для его ускоренного охлаждения иногда отливают пальцы 8. Отверстие или внутреннюю полость в отливке образует песчаный стержень 1 либо металлический 9. Металл заливают в литниковую чашу 3, и по стояку 4 и питателям 7 он заполняет полость формы 2. Поскольку металлические стержни неподатливы, то во избежание образования в отливке трещин их удаляют из формы до начала усадки металла. Если внутренняя конфигурация отливки очень сложна, то металлические стержни делают из нескольких частей или заменяют песчаными. Литниковая система размещается в плоскости разъема кокиля. Для выхода воздуха из формы во время ее заливки кроме выпоров 11 в плоскости разъема по всей высоте кокиля прорезают щели глубиной 0,3... 0,5 мм (на рисунке не показаны).

Изготавливают кокили из серого чугуна, стали, а также из цветных сплавов литьем с последующей механической обработкой. Изготовление отливок в кокиле состоит из таких операций: очистка кокиля от старой облицовки; нанесение огнеупорного защитного покрытия или покраска рабочей поверхности кокиля; сборка формы с установкой стержней; заливка кокиля; выдержка отливки в форме; раскрытие кокиля и удаление из него отливки. Во избежание отбеливания чугунных отливок подбирают химический состав чугуна, обеспечивающий графитизацию в условиях повышенной скорости охлаждения. С этой же целью перед заливкой чугуна кокиль нагревают до 250-300⁰С и время выдержки отливок в кокиле сокращают до минимума. Если в кокиле получают отливки из силумина (сплав алюминия с кремнием), то отпадает необходимость вводить натрий в сплав перед заливкой формы для измельчения структуры, так как быстрое охлаждение измельчает кремний в образующейся эвтектике. При получении в кокиле отливок из сплавов на медной основе полость формы покрывают

жирными красками. Между расплавом и кокилем образуется газовая прослойка, которая устраняет образование пригара на поверхности отливки.

Литье в кокиль — основной способ серийного и массового производства отливок из алюминиевых сплавов, позволяющий получать отливки 4—6-го классов точности с шероховатостью поверхности $Rz = 50-20$ и минимальной толщиной стенок 3—4 мм. При литье в кокиль наряду с дефектами, обусловленными высокими скоростями движения расплава в полости литейной формы и несоблюдением требований направленного затвердевания (газовая пористость, оксидные пленки, усадочная рыхлота), основными видами брака отливок являются недоливы и трещины. Появление трещин вызывается затрудненной усадкой. Особенно часто трещины возникают в отливках из сплавов с широким интервалом кристаллизации, имеющих большую линейную усадку (1,25—1,35 %). Литье выжиманием тоже является разновидностью литья в кокиль. Оно предназначено для изготовления крупногабаритных отливок (2500x1400 мм) панельного типа с толщиной стенок 2—3 мм. Для этой цели используют металлические полуформы, которые крепят на специализированных литейно-выжимных машинах с односторонним или двухсторонним сближением полуформ. Отличительной особенностью этого способа литья является принудительное заполнение полости формы широким потоком расплава при сближении полуформ. В литейной форме отсутствуют элементы обычной литниковой системы. Данным способом изготавливают отливки из сплавов АЛ2, АЛ4, АЛ9, АЛ34, имеющих узкий интервал кристаллизации.

Литье под давлением — один из наиболее производительных методов получения точных фасонных отливок из цветных металлов. Его осуществляют на компрессорных и поршневых машинах высокой производительности, дающих 200-400 отливок в час. Поршневые машины выпускают с горячей или холодной камерой сжатия, расположенной горизонтально или вертикально. Машины с горячей камерой сжатия, в

которых камера находится непосредственно в расплаве, применяют для получения отливок из сплавов с низкой температурой плавления на основе цинка, олова и свинца. Машины с холодной камерой сжатия, в которых камера вынесена за пределы расплава, используют для получения отливок из более тугоплавких цветных сплавов на основе меди, алюминия и магния.

На машинах с вертикальной холодной камерой сжатия (рисунок 1.2, а) расплав 4 заливают в камеру сжатия 5 (положение 1). Верхний поршень 1, опускаясь, давит на расплав и на нижний поршень 10, который при движении вниз открывает литниковый канал 3. Металл заполняет полость 2 пресс-формы, состоящей из двух половин 6 и 7 (положение 11). Объем жидкого металла должен быть больше объема полости формы, чтобы между верхним и нижним поршнем оставался избыток металла. Давление верхнего поршня поддерживают до полной кристаллизации отливки, после чего пресс-форму раскрывают и отливку 9 вместе с литником 12 выталкивают из формы толкателями 8. Нижний поршень выталкивает наружу избыток металла 11 (положение 111), и его отправляют в переплав.

На рисунке 1.2, б показана работа машины с горизонтальной холодной камерой сжатия. Все операции на ней выполняются в той же последовательности. На рисунке 1.2, в приведена схема работы поршневой машины с горячей камерой сжатия. Чугунный тигель 13 с жидким металлом все время подогревают снизу газом через форсунку 21. Перед заливкой пресс-форму 19 закрывают и мундштук 18 соединяется с каналом 17. При верхнем положении поршня 16 через отверстие 14 сплав заполняет камеру сжатия 15 и канал. При движении вниз поршень впрессовывает жидкий металл в полость формы. После затвердевания металла давление снимают, поршень движется вверх, форму раскрывают и отливку выталкивают толкателями 20. Машины с горячей камерой сжатия более производительны и расходуют меньше жидкого металла, однако их нельзя применять для литья

сплавов с температурой плавления более 500 °С из-за быстрого изнашивания поршня.

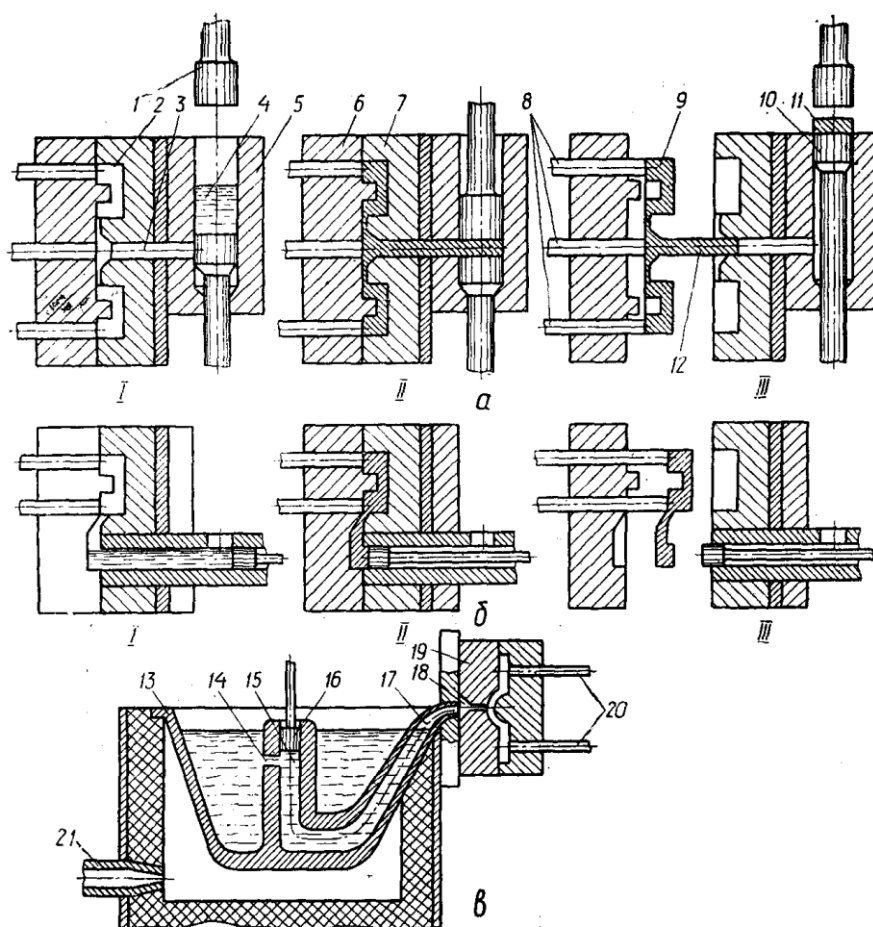


Рисунок 1.2 – Схемы поршневых машин для литья под давлением

В машинах с холодной камерой сжатия поршень контактирует с расплавом в течение короткого промежутка времени и поэтому мало изнашивается. Здесь можно значительно повысить давление, что гарантирует высокую плотность и прочность отливок. Если в машинах с горячей камерой сжатия давление достигает 20 МПа, то в машинах с холодной камерой сжатия при литье алюминиевых и медных сплавов давление может достигать 100-300 МПа. Компрессорные машины, работающие на сжатом воздухе, применяются редко и поэтому здесь не рассматриваются.

Центробежный способ литья применяется главным образом для получения полых отливок типа тел вращения (втулок, обечаек для поршневых колец, труб, гильз) из цветных и железоуглеродистых сплавов, а также биметаллов. Сущность состоит в том, что жидкий металл заливают во вращающуюся с определенной скоростью литейную форму. Она вращается в течение всего времени кристаллизации металла отливки. При этом металл центробежной силой прижимается к стенкам формы, что обеспечивает получение плотных, с повышенной прочностью отливок, так как газы и шлак, обладающие меньшей плотностью в результате сепарации, вытесняются во внутренние полости отливки и затем их удаляют механической обработкой. Ось вращения формы может быть горизонтальной, вертикальной и наклонной. Если диаметр отливки значительно меньше ее длины (трубы, гильзы, втулки), то ось вращения формы размещают горизонтально (рисунок 1.3, а). Если же диаметр отливки больше, чем ее высота (колеса, шкивы, шестерни), то ось вращения располагают вертикально (рисунок 1.3, б). В обоих случаях ось отливки совпадает с осью вращения формы и внутренняя полость получается без стержней, а толщина стенки отливки определяется количеством заливаемого металла. Этот способ используют при изготовлении отливок, имеющих форму тела вращения. При изготовлении мелких фасонных отливок ось вращения формы может не совпадать с осью отливки. В этом случае внутренние полости образуют с помощью стержней, а металл заливают в центральный общий литник, из которого по радиально расположенным питателям он попадает в полость формы (рисунок 1.3, в). Такой способ называется центрифугированием.

Использование высокопроизводительных центробежных установок, отсутствие стержней и работ, связанных с их производством, намного повышает производительность труда, а отсутствие литниковой системы и прибылей значительно экономит металл.

Центробежное литье применяют в массовом, серийном и единичном производстве отливок из различных сплавов в металлических и песчаных формах. Этим способом отливают трубы, цилиндрические втулки, гильзы автотракторных двигателей, заготовки для поршневых колец, шестерни, шкивы, орудийные стволы, а также получают двухслойные (биметаллические) отливки, поочередно заливая форму различными сплавами.

Центробежный способ получения литых чугунных труб является самым распространенным. На рисунке 1.3, г приведена схема центробежной машины. Металлическая форма 3 вращается электродвигателем 1 и охлаждается водой. Форма установлена на рельсовой тележке с уклоном 2-50. Жидкий чугун из ковша 5 по неподвижному желобу 4 попадает в форму. Форма, помимо вращения, по мере заполнения металлом перемещается влево. В крайнем левом положении форма продолжает вращаться до полной кристаллизации металла. Затем форма возвращается в исходное положение вправо, а труба вместе со стержнем 2 (образующим раструб трубы) удаляется из формы клещами влево. В труболитейных цехах успешно эксплуатируют линии центробежного литья чугунных труб диаметром 80-125, 100-150 и 200-300 мм с автоматическими установками для изготовления стержней раструба. Поверхность труб при этом получается отбеленной, и возникают начительные внутренние напряжения. Поэтому после удаления из формы трубы отжигают при температуре 850-920⁰С.

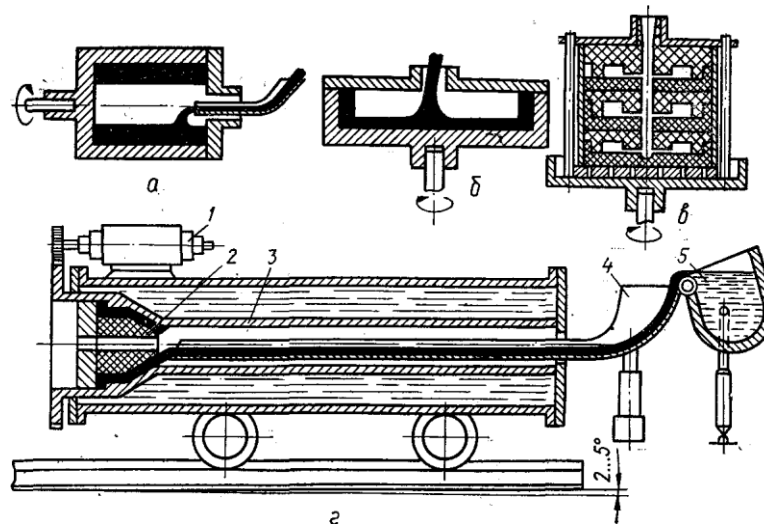


Рисунок 1.3 – Схемы центробежного литья

Литье по выплавляемым (вытапливаемым) моделям состоит в следующем. Металл заливают в разовую тонкостенную керамическую форму, изготовленную по моделям (также разовым) из легкоплавящегося модельного состава. Этим способом получают точные, практически не требующие, механической обработки отливки из любых сплавов массой от нескольких граммов до 100 кг. Точность размеров и чистота поверхности получаемых отливок таковы, что позволяют сократить объем механической обработки или отказаться от нее, что особенно важно при изготовлении деталей из труднообрабатываемых сплавов. Технология, производства отливок по выполняемым моделям включает следующие этапы: изготовление пресс-форм для моделей; получение восковых моделей запрессовкой модельного состава в пресс-формы; сборка блока моделей на общий питатель (в случае мелких отливок); нанесение огнеупорного покрытия на поверхность единичной модели или блока; вытапливание моделей из огнеупорных (керамических) оболочек-форм; прокаливание форм; заливка металла в горячие формы. Разъемные пресс-формы изготовляют из стали или других сплавов по чертежу детали или ее эталону с учетом усадки модельной массы и металла отливки. Модельный состав (например, из парафина с

добавками церезина, нефтяного битума, канифоли, полиэтилена) в пастообразном состоянии запрессовывают с помощью шприца или на запрессовочном станке. Полученные модели извлекают из пресс-форм и облицовывают в несколько слоев огнеупорным покрытием, окуная несколько раз в связующий состав и обсыпая кварцевым песком. Каждый слой покрытия подсушивается. Модель мелких отливок перед нанесением покрытия собирают в блоки, соединяя их (припаивая) с общей литниковой системой, а затем облицовывают блок. Вытапливание моделей из керамических оболочек производится горячим воздухом или горячей водой. Модельный материал собирается для повторного использования, а полученная керамическая литейная форма с гладкой рабочей поверхностью поступает на прокаливание. Последнее необходимо для придания форме механической прочности и окончательного удаления модельного материала. Форму помещают в стальной ящик, засыпают кварцевым песком, оставляя литниковую чашу доступной для заливки металла, и прокаливают при температуре 850-900⁰С. Заливка металла производится в горячую форму, что способствует улучшению жидкотекучести металла и позволяет получать сложнейшие тонкостенные отливки. После охлаждения отливку очищают от слоя огнеупорного покрытия ударами вручную или на пневмовибраторах. В полостях и отверстиях остатки формы удаляются выщелачиванием в кипящем растворе едкого натра, затем отливку промывают в теплой воде с добавлением соды. Отделение литниковой системы от отливок может производиться на токарных и фрезерных станках, вулканическими абразивными кругами и на вибрационных установках. Литьем по выплавляемым моделям получают разнообразные сложные отливки для автотракторостроения, приборостроения, для изготовления деталей самолетов, лопаток турбин, режущих и измерительных инструментов. Стоимость 1 т отливок, получаемых по выплавляемым моделям, выше, чем изготавливаемых другими способами, и зависит от многих

факторов (серийности выпуска деталей, уровня механизации и автоматизации литейных процессов и процессов механической обработки отливок). В большинстве случаев снижение трудоемкости механической обработки, расхода металла и металлорежущего инструмента при применении точных отливок взамен поковок или отливок, полученных другими способами, дает значительный экономический эффект. Наибольший эффект достигается при переводе на литье по выплавляемым моделям деталей, в структуре себестоимости которых большую долю составляют затраты на металл и фрезерную обработку, особенно при применении труднообрабатываемых конструкционных и инструментальных материалов. Внедрению литья по выплавляемым моделям уделяется большое внимание, так как большинство операций легко поддается механизации и автоматизации. Совместными усилиями работников научно-исследовательских институтов и передовых заводов создаются высокоэффективные автоматические линии и автоматизированные цехи для литья по выплавляемым моделям.

Литье в оболочковые формы применяется для получения отливок массой до 100 кг из чугуна, стали и цветных металлов. Сущность заключается в том, что разовую литейную форму изготавливают в виде оболочки, используя для формовочной смеси в качестве связующего материала фенольные терморезистивные смолы, прочно цементирующие мелкий кварцевый песок, являющийся наполнителем. Изготовление оболочковой формы исключает потребность в опоках, резко снижает расход формовочной смеси, легко механизуется и автоматизируется. Использование формовочной смеси, состоящей из 92-95% мелкого кварцевого, магнезитового или циркониевого песка и 4-6% терморезистивной фенолформальдегидной смолы, обеспечивает малую шероховатость поверхности и более высокую точность отливок (5-8 класса), чем

изготовленных в песчаноглинистых формах, так как оболочка твердеет на модели и сохраняет ее размеры.

Литье в оболочковые формы применяют в крупносерийном и массовом производствах при получении ответственных фасонных мелких и средних отливок из различных сплавов.

Технология изготовления оболочковой формы (рисунок 1.4) начинается с нанесения пульверизатором на металлическую модельную плиту разделительного состава, облегчающего снятие оболочки. Затем модельную плиту нагревают в электрической печи до температуры 200-220⁰С (рисунок 1.4, а), устанавливают над бункером и закрепляют модель вниз (рисунок 1.4). Бункер переворачивают на 180⁰, и формовочная смесь падает на нагретую модельную плиту (рисунок 1.4, б). При выдержке в течение 20-30 с смола плавится и, обволакивая тонкой пленкой мелкие зерна песка, образует оболочку толщиной 6-8 мм. Бункер возвращают в исходное положение, и непрореагировавшая формовочная смесь падает на его дно (рисунок 1.4, г). Снятую с бункера модельную плиту с непрочной оболочкой отправляют в электрическую печь с температурой около 350⁰С (рисунок 1.4, д). Здесь смола в течение 90-180 с полимеризуется и необратимо твердеет, образуя прочную оболочковую полуформу. По такой же технологии изготавливают другую полуформу.

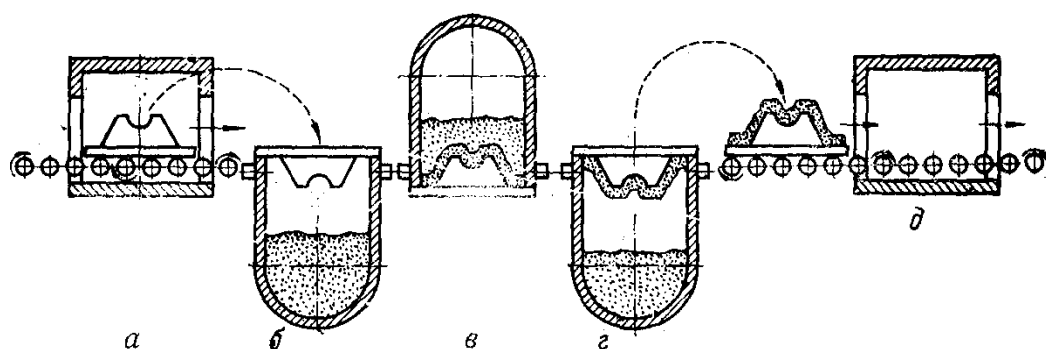


Рисунок 1.4 – Схема изготовления оболочковых форм

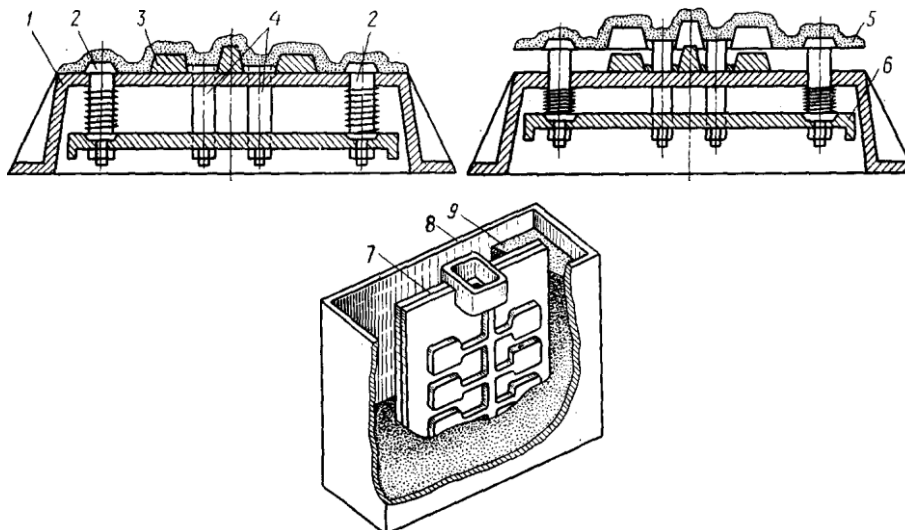


Рисунок 1.5 – Модельная плита с оболочковой полуформой
и собранная форма

Для снятия готовой оболочковой полуформы (рисунок 1.5) модельная плита 1 с закрепленной полумodelью 3 снабжена толкателями 4, находящимися на уровне плиты, и толкателями 2, которые выступают из нее и образуют в полуформе углубления. На другой модельной плите (здесь не показано) толкатели расположены на несколько миллиметров ниже плоскости разъема, чтобы образовать выступы на второй полуформе против углублений на первой. С помощью этих выступов и углублений фиксируют положение полуформ при сборке оболочковой формы. При нажатии на плиту 6 толкатели снимают полуформу 5 с модельной плиты. В одной из полуформ на стержневые знаки устанавливают стержень, закрывают другой полуформой, скрепляют их скобами, струбцинами или склеивают по плоскости разъема. Собранную оболочковую форму 7 помещают в металлический ящик 8, засыпают крупным песком или чугуной дробью 9 и заливают металлом. К моменту полной кристаллизации металла отливки

смола из смеси выгорает, форма и стержни разупрочняются и легко разрушаются, освобождая отливку при выбивке.

К **литью под регулируемым давлением** относят способы литья, сущность которых заключается в том, что заполнение полости формы расплавом и затвердевание отливки происходит под действием избыточного давления воздуха или газа.

Литье под регулируемым давлением (рисунок 1.6) создает широкие возможности для управления заполнением формы расплавом.

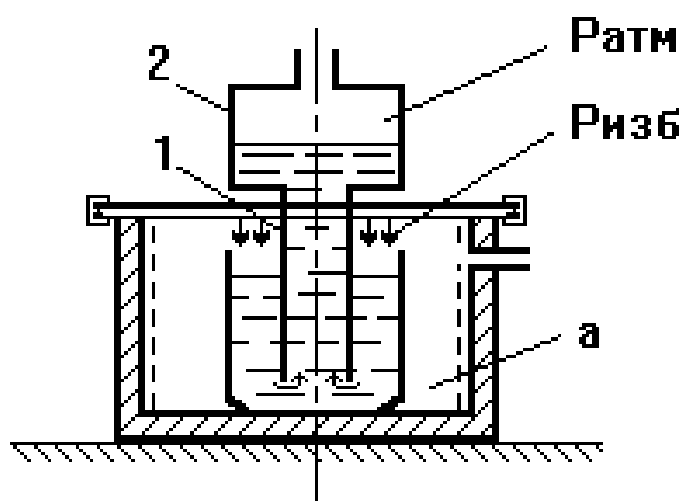


Рисунок 1.6 – Литье под регулируемым давлением

Если внутрь герметичной камеры а подавать сжатый воздух или газ под давлением $P_{изб} > P_{атм}$, то за счет разницы давлений расплав поднимется по металлопроводу 1 и заполнит форму 2 до некоторого уровня. Такой способ заполнения называют литьем под низким давлением. Термин "низкое давление" используется потому, что для подъема расплава и заполнения формы требуемое избыточное давление менее 0.1 МПа. Литье под низким давлением является другой разновидностью литья в кокиль. Оно получило применение при изготовлении крупногабаритных тонкостенных отливок из алюминиевых сплавов с узким интервалом кристаллизации (АЛ2, АЛ4, АЛ9, АЛ34). Так же как и при литье в кокиль, наружные поверхности отливок

выполняются металлической формой, а внутренние полости — металлическими или песчаными стержнями. Для изготовления стержней используют смесь, состоящую из 55% кварцевого песка 1К016А; 13,5 % полужирного песка П01; 27% пылевидного кварца; 0,8% пектинового клея; 3,2% смолы М и 0,5% керосина. Такая смесь не образует механического пригара. Заполнение форм металлом осуществляют давлением сжатого осушенного воздуха (18—80 кПа), подаваемого на поверхность расплава в тигле, нагретого до 720—750⁰С. Под действием этого давления расплав вытесняется из тигля в металлопровод, а из него в коллектор литниковой системы и далее — в полость литейной формы.

Основными преимуществами процесса литья под низким давлением являются: автоматизация трудоемкой операции заливки формы; возможность регулирования скорости потока расплава в полости формы изменением давления в камере установки; улучшение питания отливки; снижение расхода металла на литниковую систему.

Основные недостатки невысокая стойкость части металлопровода, погруженной в расплав, что затрудняет использование способа литья для сплавов с высокой температурой плавления; сложность системы регулирования скорости потока расплава в форме, вызванная динамическими процессами, происходящими в установке при заполнении ее камеры воздухом, нестабильностью утечек воздуха через уплотнения, понижением уровня расплава в установке по мере изготовления отливок; возможность ухудшения качества сплава при длительной выдержке в тигле установки; сложность эксплуатации и наладки установок. Преимущества и недостатки способа определяют рациональную область его применения и перспективы использования. Литье под низким давлением наиболее широко применяют для изготовления сложных фасонных и особенно тонкостенных отливок из алюминиевых и магниевых сплавов, простых отливок из медных сплавов и сталей в серийном и массовом производстве.

Особенности формирования отливки при литье под низким давлением. Заполнение форм расплава при этом способе литья может осуществляться со скоростями потока, которые можно регулировать в широком диапазоне. Для получения качественных отливок предпочтительно заполнять форму сплошным потоком, при скоростях, обеспечивающих качественное заполнение формы и исключающих захват воздуха расплавом, образование в отливках газовых раковин, попадание в них окисных пленок и неметаллических включений. Однако уменьшение скорости потока, необходимое для сохранения его сплошности может вызвать преждевременное охлаждение и затвердевание расплава, т.е. до полного заполнения формы. Поэтому, как и в других литейных процессах, важно согласовывать гидравлические и тепловые режимы заполнения формы расплавом.

Если в герметичной камере б установок создавать вакуум, а в камере а давление поддерживать равное атмосферному, то заполнение формы произойдет за счет разницы давлений $P_{атм} - P$. Такой способ заполнения называют литьем вакуумным всасыванием (рисунок 1.7).

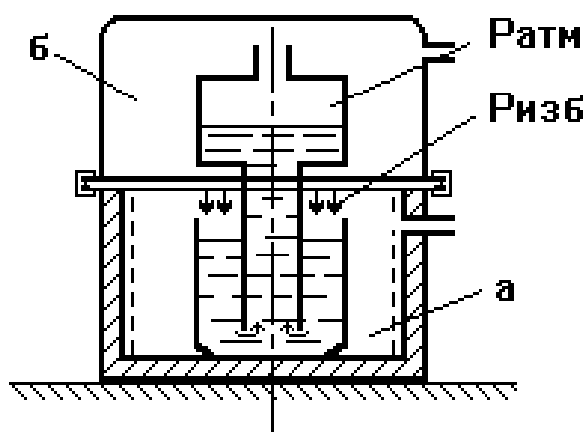


Рисунок 1.7 – Литье вакуумным всасыванием

Используя схему установки, аналогичную данной, можно осуществить заполнение формы иначе. Положим, что в камерах а и б вначале создано одинаковое, но больше атмосферного давление воздуха или газа $P_k > P_{атм}$. Затем подача воздуха в камеру б прекращается, а в камеру а продолжается; давление в камере а повышается до $P_k + \Delta P$. Тогда металл будет подниматься по металлопроводу вследствие разницы давлений $P_a - P_b$, т.е. аналогично тому, как и при литье под низким давлением. Того же результата можно достичь, если понижать давление в камере б, оставляя постоянным давление в камере а. Такие процессы называют литьем под низким давлением с противодавлением.

Установки для литья под регулируемым давлением - сложные динамические системы, позволяющие в широких пределах регулировать скорость заполнения формы расплавом. Использование таких установок позволяет заполнить формы тонкостенных 9600 оливок, изменить продолжительность заполнения отдельных участков формы отливок сложной конфигурации с переменной толщиной стенки с целью управления процессом теплообмена расплава и формы, добиваясь рациональной последовательности затвердевания отдельных частей отливки. Приложение давления на затвердевающий расплав позволяет улучшить условия питания, усадки отливки, повысить ее качество - механические свойства и герметичность. В рассматриваемых процессах после заполнения формы давление действует на расплав, который из тигля через металлопровод поступает в затвердевающую отливку и питает ее. Благодаря этому усадочная пористость в таких отливках уменьшается, плотность и механические свойства возрастают. Литье под регулируемым давлением осуществляется на установках так, что процесс заполнения формы расплавом - самая трудоемкая и неприятная с точки зрения охраны труда и техники безопасности операция - выполняется автоматически. Конструкции установок и машин для этих литейных процессов обеспечивают также

автоматизацию операций сборки и раскрытия форм, выталкивания отливки и ее удаления из формы. Таким образом, процессы литья под регулируемым давлением позволяют повысить качество отливок и обеспечить автоматизацию их производства. В практике наибольшее применение нашли следующие процессы литья под регулируемым давлением: литье под низким давлением, литье под низким давлением с противодавлением, литье вакуумным всасыванием, литье вакуумным всасыванием с кристаллизацией под давлением (вакуумно - компрессионное литье).

Литье с противодавлением. Развитие литья под низким давлением является литье с противодавлением. Установка для литья с противодавлением состоит из двух камер. В камере, устройство которой подобно герметической камере установки литья под низким давлением, располагается тигель с расплавом. В камере находится форма, обычно металлическая. Камеры разделены герметичной крышкой, через нее проходит металлопровод, соединяющий тигель и форму. Эти камеры прочно соединены друг с другом зажимами. Давление воздуха, под которым происходит заполнение формы расплавом, будет соответственно равно разнице давлений в нижней P_a и верхней P_b камерах установки: $\Delta P = P_a - P_b$. Скорость подъема расплава в металлопроводе и полости формы так же, как и при литье под низким давлением, будет зависеть от всей совокупности рассмотренных выше конструктивных и пневматических характеристик системы, определяющих скорость нарастания разницы давлений ΔP , во время работы установки. Литье с противодавлением позволяет уменьшить выделение газов из расплава, улучшить питание отливок и вследствие этого повысить их герметичность, а также механические свойства. Этот способ литья дает наибольший эффект при изготовлении отливок с массивными стенками равномерной толщины из алюминиевых и магниевых сплавов, кристаллизующихся в широком интервале температур. Использование второй стадии процесса - кристаллизации под всесторонним избыточным

давлением для тонкостенных отливок не всегда приводит к заметному улучшению свойств. Это объясняется тем, что продолжительность кристаллизации тонкостенных отливок мала и отливка затвердевает прежде, чем давление в верхней камере установки достигнет необходимой величины.

Литье вакуумным всасыванием. Сущность процесса литья вакуумным всасыванием состоит в том, что расплав под действием разряжения, создаваемого в полости формы, заполняет ее и затвердевает, образуя отливку. Изменением разности между атмосферным давлением и давлением в полости формы можно регулировать скорость заполнения формы расплавом, управляя этим процессом. Вакуумирование полости форм при заливке позволяет заполнить формы тонкостенных отливок с толщиной стенки 1-1.5 мм, исключить попадание воздуха в расплав, повысить точность, и механические свойства отливок. В производстве используют установки двух основных разновидностей. Установки первого типа имеют две камеры: нижнюю и верхнюю. Нижняя камера представляет собой раздаточную печь с электрическим или газовым обогревом, в которой располагается тигель с расплавом. Верхняя камера расположена на крышке нижней камеры, в крышке установлен металлопровод. Форму устанавливают и закрепляют в камере так, чтобы литник соединялся прижимами с крышкой. Полость верхней камеры через вакуум-привод соединена с ресивером, в котором насосом создается разряжение, регулируемое системой управления. В начальный момент клапан управления открывается, в верхней камере создается разряжение, и расплав вследствие разницы давлений в камерах по металлопроводу поднимается и заполняет полость формы. После затвердевания отливки клапан системы управления соединяет полость верхней камеры с атмосферой, давление в обеих камерах становится одинаковым, а остатки незатвердевшего расплава сливаются из металлопровода в тигель. Верхняя камера снимается, форма с отливкой извлекается и цикл может повторяться. Установки такого типа используют

обычно для улучшения заполнения форм тонкостенных сложных фасонных отливок из алюминиевых и магниевых сплавов с толщиной стенки 2-2.5мм, а иногда и до 1-1.5мм. Установки второго типа используют для отливки втулок, слитков и заготовок простой конфигурации в водоохлаждаемых системах кристаллизаторы. Носок металлического водоохлаждаемого кристаллизатора погружается в расплав, находящийся в тигле раздаточной печи. Рабочая полость кристаллизатора, образующая отливку, соединяется вакуумом-проводом с вакуумным ресивером. Разрежение в системе создается вакуумом-насосом и регулируется натекателем. Поворотом распределительного крана рабочая полость кристаллизатора соединяется с вакуумным ресивером. В полости кристаллизатора создается разрежение, и расплав всасывается внутрь кристаллизатора, поднимаясь на высоту, пропорциональную разрежению $h_{рт}$ и обратно пропорционально ее плотности. После затвердевания отливки носок кристаллизатора извлекают из ванны расплава, поворотом крана, рабочую полость соединяют с атмосферой и отливка выпадает из кристаллизатора в приемный короб.

Особенности формирования отливки. Форма может заполняться расплавом с требуемой скоростью, плавно, без разбрызгивания, сплошным фронтом; расплав, заполнивший форму, затвердевает в условиях вакуума; газы, содержащиеся в расплаве, могут из него выделяться, благодаря чему создаются условия для получения отливок без газовых раковин и пористости. Для получения плотных отливок без усадочных дефектов необходимо согласовывать интенсивности затвердевания и питания отливки. Обычно при литье вакуумным всасыванием слитков, втулок, расплав засасывают в тонкостенный металлический водоохлаждаемый катализатор, благодаря чему отливка затвердевает с высокой скоростью. Таким способом можно получать тонкостенные отливки типа втулок без стержней. В этом случае после всасывания расплава в кристаллизатор и намораживания на внутренних стенках кристаллизатора корочки твердого металла заданной

толщины вакуум отключается и незатвердевший расплав сливается обратно в тигель. Таким образом получают плотные заготовки втулок без газовых и усадочных раковин и пористости. Способ позволяет получать отливки из легких цветных и медных сплавов, чугуна и стали. Наиболее часто этот способ используется для литья заготовок втулок, вкладышей, подшипников скольжения из дорогостоящих медных сталей. При этом наиболее ярко проявляются основные преимущества данного способа: спокойное заполнение формы расплавом с регулируемой скоростью, сокращение расхода металла вследствие устранения литников и прибылей, автоматизация процесса заполнения формы.

В производстве литых заготовок специальные виды литья в настоящее время занимают значительное место, хотя 70-75% общего объема производства отливок (в тоннах) получают обычным методом литья в песчаную форму и только 25-30% «специальными» методами (это далеко не точно характеризует значение объема производства специальными видами литья). Методами специального литья изготавливают не крупные отливки из черных сплавов и подавляющее большинство, как правило, более легких отливок из цветных сплавов.

Кроме способов литья «погружением» к специальным способам литья следует отнести способы «жидкостного прессования» и литья с использованием капиллярного эффекта.

Наиболее эффективным, как с точки зрения получения мелкого зерна, так и высоких физико-механических и эксплуатационных свойств является литье под давлением в штамповой оснастке жидкостное прессование. Наличие высоких скоростей охлаждения в инструментальной штамповой оснастке является предпосылкой получения более мелкого зерна в литой заготовке, тем более, если она имеет форму листа или плиты.

Отливки изготавливают в формах (пресс-формах, штампах), состоящих из пуансона (прессующего узла), матрицы, толкателей и съемников.

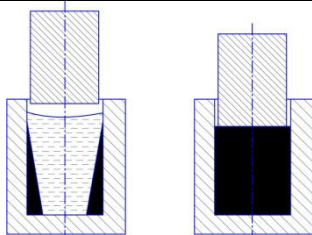
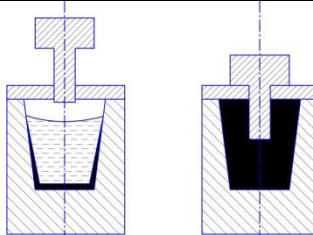
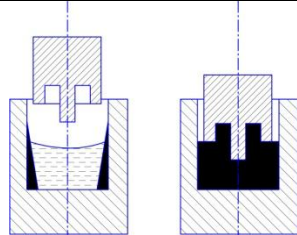
Верхнюю плиту с закрепленными на ней деталями прессующего узла монтируют на ползуне пресса, а нижнюю плиту с размещенными на ней матрицей и механизмом выталкивания отливки на столе пресса.

Процесс заключается в том, что расплав под действием собственной силы тяжести заливают в матрицу, затем пуансоном осуществляют окончательное оформление контуров отливки и последующее ее уплотнение (выдержку давлением) до окончательного затвердевания. После извлечения из пресс-формы (ПФ) отливку можно подвергать различным видам последующей обработки (термической или механической).

Способом ЛКД изготавливают простые и сложные по конфигурации заготовки из чистых металлов и сплавов на основе алюминия, железа, магния, меди и цинка, используя для этой цели как специализированные, так и неспециализированные гидравлические прессы и машины.

Различают следующие схемы процесса ЛКД (таблица 1.1): 1-под поршневым давлением (поршневое прессование); 2 - под пуансонным давлением (пуансонное прессование); 3 - под пуансонно-поршневым давлением (пуансонно-поршневое или комбинированное прессование).

Таблица 1.1 – Классификация схем прессования ЛКД

Группа (схема)		
1	2	3
Поршневое прессование	Пуансонное прессование	Пуансонно-поршневое прессование
		

Важным критерием, характеризующим каждую схему процесса ЛКД, является отношение объема не затвердевшего сплава $V_{нс}$, вытесненного пуансоном во время окончательного оформления контуров отливки ко всему

объему $V_{от}$: $K_f = V_{нс} / V_{от}$. В зависимости от схемы ЛКД коэффициент формообразования K_f может изменяться от нуля до единицы.

При поршневом прессовании давление кристаллизующемуся расплаву передается через пуансон, перекрывающий открытую полость матрицы и действующий на верхний торец формирующейся отливки в течение времени, необходимого для ее затвердевания. К моменту приложения давления в местах соприкосновения расплава с матрицей образуется корка, а уровень сплава в матрице понижается вследствие объемной усадки. Поэтому пуансон (поршень) воздействует вначале на вертикальную корку, а после соприкосновения с не затвердевшим сплавом на всю отливку.

Формообразование отливки при поршневом прессовании практически полностью осуществляется во время свободной заливки расплава в матрицу. Основная масса расплава при контакте с пуансоном перемещается (за исключением верхней части) при понижении уровня во время уплотнения затвердевающей отливки, т.е. $K_f = 0$.

Площадь проекции пуансона при поршневом прессовании в большинстве случаев соответствует площади проекции отливки, а следовательно, и рабочей полости матрицы. Можно использовать пуансон, площадь прессующей части которого меньше максимальной площади проекции отливки, для чего необходимо применение ПФ с разъемными матрицами.

При прессовании под действием выступающей рабочей части пуансона не затвердевший сплав выдавливается вверх до полного заполнения рабочей полости ПФ. Особенностью этой схемы является то, что пуансон вначале соприкасается с расплавом, удаленном от боковых стенок матрицы, и вытесняет его выше уровня заливки. Пуансон не соприкасается с вертикальной коркой, образовавшейся до его внедрения в расплав. Таким образом, формообразование отливки частично происходит при заливке расплава в матрицу и выдержке его в матрице до подхода пуансона, а

заканчивается после внедрения пуансона в кристаллизующий расплав. При этом $K_f=0,1\dots 0,7$.

Когда формообразование окончено, давление передается только на внутреннюю поверхность отливки или одновременно на верхний торец и внутреннюю поверхность отливки. При пуансонном прессовании проекция прессующей части пуансона может быть меньше максимальной площади проекции отливки или равна ей.

При пуансонно-поршневом (комбинированном) прессовании формообразование отливки частично осуществляется во время заливки расплава в матрицу и выдержке его в ней до соприкосновения с пуансоном, а заканчивается после вытеснения части не затвердевшего сплава в полости, ограниченные пуансоном и расположенные выше уровня заливки расплава в матрицу. Перемещение не затвердевшего сплава происходит как при сжатии вертикальной корки, так и при выдавливании его вверх выступающими элементами пуансона.

Это способ открывает совершенно новые возможности, поскольку нет большого различия в условиях получения простых и сложных профилей. Этот способ делает широкодоступным изделия из металлов сложного профиля типа продольнооребрёные трубы и другие профильные изделия. Такие изделия в настоящее время изготавливаются давлением из больших слитков (прокаткой, прессованием и т.п.) с применением мощного сложного, дорогостоящего оборудования, больших энергетических затрат на деформирование металла.

Известно, что характерным свойством жидкости является свойство несохранения формы. Жидкость принимает форму сосуда, в который она налита. Однако из этого правила имеются исключения, а именно, при некоторых условиях жидкость может сохранить форму за счёт некоторых эффектов, например капиллярных, кинетических, центробежных и др. Эти явления отдельно или в сочетании друг с другом лежат в основе нового

принципа формообразования. Этот принцип заключается в том, что желаемая форма создаётся в жидком состоянии за счёт эффектов, позволяющих жидкости сохранять форму. Понижая температуру объёма жидкости, сохраняющего определённую форму, можно кристаллизовать этот объём и тем самым получить желаемую форму в твёрдом состоянии.

Особенность способа литья длинномерных заготовок из расплава с использованием капиллярного эффекта заключается в том, что на горизонтальную поверхность расплавленного металла помещается пластинка из материала инертного по отношению к расплаву. В пластинке имеется прорезь-щель, вид и размеры которой находятся в соответствии с изделием, которое желательно, получить. Эта пластинка называется формообразователем. Через щель формообразователя в жидкий металл опускается затравка, например из латунной ленты, в соответствии с видом щели. На заготовку намораживается металл. Если дать затравке движение вверх, то замороженный металл будет за ней тянуться. Расплавленный металл поднимается выше горизонтального уровня расплава в тигле за счёт капиллярных сил. При попадании в область низкой температуры над поверхностью расплава он будет застывать. Можно так подобрать охлаждение и скорость движения затвердевшего металла, что из жидкости будет непрерывно вытягиваться изделие: лист, пруток, труба, профиль и т.п.

На рисунке 1.8 представлены примеры изделий, которые получены непосредственно из расплава с использованием капиллярного эффекта.

К специальным способам литья относится рафинирование, основанные на физическом воздействии в рамках системы «расплав - внешние силы».

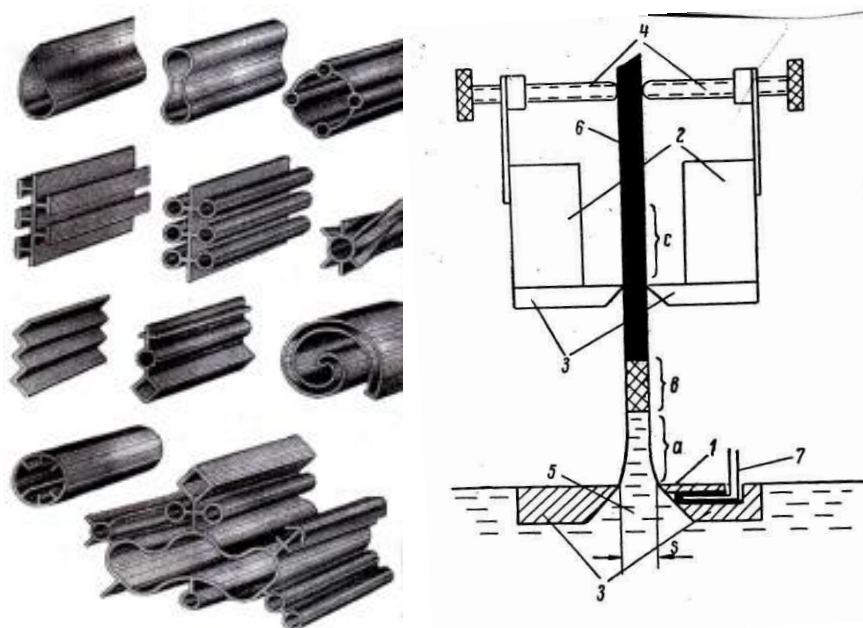


Рисунок 1.8 – Схема сечения формирующего устройства и ленты

Из всех известных физических способов рафинирования наибольшее распространение получило вакуумирование. Тем не менее, такие физические способы, как электрообработка, ультразвуковая, акустическая, электрогидроимпульсная, магнитно-импульсная, плазменная обработки представляют несомненный практический интерес и являются перспективными направлениями в области рафинирования алюминиевых расплавов. В первую очередь, это связано с тем, что данные способы не загрязняют атмосферу цехов вредными газообразными продуктами реакции и не способствуют образованию в шлаках водорастворимых соединений. Технологии обработки расплавов физическими способами представляются более управляемыми, что позволяет гибко устанавливать режимы обработки в зависимости от природы сплава, степени его загрязнения и т.д. Кроме того, исследования показывают, что помимо рафинирующего действия физические способы оказывают и модифицирующее воздействие на структуру литых изделий.

2 Специальные способы литья с физическим воздействием на расплав

К специальным способам литья можно отнести способы физического воздействия на расплав для получения модифицирующего эффекта. В связи со структурными особенностями литых сплавов, такими как наличие грубых и хрупких включений кремния и интерметаллических фаз, прочностные характеристики силуминов невысокие, особенно низка пластичность. Силумины с мелкозернистым кристаллическим строением обладают более высоким уровнем механических и литейных свойств. Поэтому измельчение выделений α -твердого раствора и кремния является основной задачей в направлении улучшения свойств алюминиево-кремниевых сплавов. Для улучшения структуры и механических свойств литейных промышленных алюминиевых сплавов регулируют режимы плавки и литья, условия кристаллизации отливок. Однако наиболее эффективным фактором, определяющим благоприятное структурообразование силуминов, является модифицирование.

В последнее время повышенное внимание уделяется исследованию различных способов воздействия на жидкий и кристаллизующийся металл, позволяющих получить модифицированную структуру без введения специальных добавок – модификаторов. Одним из наиболее эффективных способов повышения качества литого металла, при одновременном снижении материальных и энергетических затрат на его изготовление, является разработка и освоение новых методов литья, основанных на использовании физических воздействий на металлический расплав на всех этапах формирования структуры и свойств литых изделий.

Физические воздействия существенным образом влияют не только на процессы тепломассопереноса, но и на гидродинамические процессы конвективного и теплокапиллярного перемещения фаз. Наиболее важными результатами таких воздействий являются: воздействие на устойчивость

границы кристаллизации и формирование кристаллической структуры литья; перемещение центров кристаллизации и плавающих кристаллов из зоны двухфазного состояния в объем затвердевающего расплава; всплывание неметаллических включений и газов; смывание ликвационных элементов с границы фаз и перераспределение их в объеме отливки; управление характером конвективного движения расплава в затвердевающем замкнутом объеме отливки; интенсификация передачи теплоты от перегретого расплава к затвердевающей корке и не затвердевшей части отливки; гомогенизация химического состава металлического расплава.

В зависимости от вида энергоносителя все существующие физические способы воздействия на расплав можно разделить на следующие группы: механические; тепловые; барометрические; электромагнитные; высокоэнергетические (корпускулярные).

2.1 Механические способы воздействия на расплав

Механические способы воздействия на расплав основываются на перемещении микрообъемов расплава друг относительно друга (перемешивание, фильтрация, продувка газами, обработка вибрацией и ультразвуком) для получения однородной мелкозернистой структуры по всему объему.

Широко применяются вибрационные воздействия, например, вибрация формы с использованием низких частот (30-150 Гц) [2, 3, 4 – 7] или ультразвуковых колебаний [3, 8 – 10]. Кроме того используются способы перемешивания расплава в форме, среди которых наиболее изученным является перемешивание сплавов в центробежной форме путем применения изменяемой скорости вращения [11, 12].

За последние годы разработаны и самые различные схемы фильтрации расплава металла с использованием керамических фильтров, стеклоткани с

малым размером ячейки, совмещенные методы фильтрации и продувки газами, ультразвуковой обработки и т.д. [13, 14].

2.2 Тепловые способы воздействия на расплав

Работы М.Х. Шоршорова [15], Б.А. Баумана, Г.В. Тягунова [16], Г.С. Ершова, В.З. Кисунько, А.Г. Спасского, Г.Г. Крушенко, Ри Хосена, И.А. Новохатского, Ю.Н. Тарана, В.И. Никитина, И.Ф. Селянина и др. показали, что подготовка расплава к кристаллизации за счет уточнения режимов его термовременной обработки (ТВО) влияет на процесс затвердевания и способствует улучшению структуры и свойств литого металла [17 – 23]. Создан целый ряд эффективных технологий ТВО, представляющих собой перегрев расплава выше температуры ликвидус до или выше критических температур, в результате которого происходят структурные перестройки элементов расплава, и определенную выдержку при этих температурах [19, 21].

Данный способ обработки способствует устранению отрицательного наследственного влияния шихтовых материалов и тем самым улучшает структуру и повышает уровень механических свойств литых алюминиевых сплавов, не требуя при этом применения дополнительного оборудования.

Для гарантированного измельчения структуры по всему объему расплава перегрев применяется при оптимальном повышении его температуры, так как произвольное увеличение температуры жидкого металла и произвольная выдержка при этой температуре могут привести к значительному газонасыщению расплава, снижению служебных характеристик вследствие перемодифицирования структуры, изменению химического состава сплава из-за угара легирующих и модифицирующих элементов [19]. Так, оптимальные температуры нагрева для расплавов

силуминов, по мнению различных исследователей, составляют от 800⁰С до 1150⁰С в зависимости от марки сплава и состава шихты.

Высокотемпературный тип структуры ближнего порядка жидкой фазы можно зафиксировать путем быстрого охлаждения расплава перед заливкой – термоскоростной обработкой (ТСО), так как скорость структурных превращений в жидкой фазе достаточно низкая, несмотря на сравнительно большие скорости процессов диффузии. Увеличение скорости охлаждения расплава является также значимым фактором, приводящим к измельчению микроструктуры и повышению механических свойств [24].

2.3 Барометрические способы воздействия на расплав

Барометрические способы воздействия основаны на создании внешнего давления, отличного от атмосферного (от глубокого вакуума до кристаллизации под сверхвысоким давлением).

Широко используются способы литья под регулируемым перепадом газового давления. Объединяющим технологическим признаком этой группы способов литья является заливка формы выдавливанием жидкого металла снизу вверх из тигля установки через металлопровод под действием, создаваемого в них перепада газового давления. К литью под регулируемым перепадом газового давления относятся три способа литья [25]:

1. При наличии в полости формы давления газа, соответствующего атмосферному, заливка осуществляется благодаря избыточному давлению газа над зеркалом расплава в тигле установки. Этот способ получил название литья под низким давлением (ЛНД). Сущность метода заключается в том, что на жидкий металл, находящийся в герметичном тигле, подается избыточное давление (1,0 атм), под воздействием которого металл по металлопроводу поднимается вверх и заполняет полость литейной формы. В отличие от большинства известных способов

литья, основанных на заливке дозы жидкого металла непосредственно в форму или в промежуточное заливочное устройство в условиях ЛНД жидкий металл, находящийся в тигле, металлопроводе и полости литейной формы, в течение всего процесса формирования отливки составляет единую гидравлическую, тепловую, силовую и концентрационную замкнутую систему.

2. Заполнение формы расплавом происходит вопреки препятствию находящегося в ее полости сжатого газа, давление которого превышает атмосферное. Такой способ литья называется литье с противодавлением (ЛПД). Основой этого способа является ЛНД. После смыкания полуформ и герметизации формы в камерах заливочного устройства и формы синхронно увеличивают давление газа до рабочего, при этом движение расплава отсутствует. Необходимый для заполнения полости формы жидким металлом перепад давлений образуется при уменьшении на эту величину давления в камере с формой или соответствующего повышения давления газа над зеркалом расплава в тигле установки. В итоге при ЛПД (как и при ЛНД) заполнение форм расплавом осуществляется в результате создания соответствующего перепада давлений.
3. Способ литья вакуумным всасыванием (ЛВВ) основан на прямо противоположном эффекте – устранении противодействия газа в полости формы путем ее вакуумирования. При ЛВВ получают полые заготовки всасыванием расплава в изложницу и последующим сливом не затвердевшего остатка обратно в тигель. Способом ЛВВ могут быть получены также сплошные отливки и слитки в водоохлаждаемых кристаллизаторах.

Кроме того, существуют и другие способы, например, литье под всесторонним газовым давлением (ЛВГД), называемое также автоклавное. Сущность процесса ЛВГД состоит в том, что расплав выплавляют и заливают в литейную форму под атмосферным давлением, после чего форму

помещают в автоклав, в котором создается избыточное давление сжатого воздуха (или газа) 0,4 – 0,6 МПа. Таким образом, при ЛВГД под избыточным давлением протекает заключительная стадия литейного цикла – затвердевание отливки [26].

2.4 Высокоэнергетические способы воздействия на расплав

В последние годы активно развиваются новые методы высокоэнергетической (корпускулярной) обработки, например, лазером, плазмой или микрочастицами с высокой энергией. За счет воздействия на более глубокие уровни структуры сплавов они позволяют получать принципиально новые свойства.

Например, известен способ воздействия лазерным излучением на расплавы, содержащие алюминий [27]. Суть способа заключается в облучении расплава непрерывным (лазер – Камета-2, частота ≈ 1014 Гц) или импульсным с синусоидальным заполнением (лазер Квант-15, частота ≈ 1015 Гц) электромагнитным излучением. Проводится обработка поверхности расплавленного металла сфокусированным лучом путем перемещения его по поверхности, либо расфокусированным лучом, охватывающим всю поверхность.

Отмечено, что после облучения изменяется фазовый состав и структура алюминиевых сплавов, а также увеличение твердости облученных образцов по сравнению с необлученными. Физику такого воздействия авторы объясняют повышением температуры в локальной области, где действует излучение. Это приводит к изменению структуры расплава и образованию новых химических соединений: оксидов, нитридов, гидридов. Разный коэффициент поглощения излучения для различных элементов расплава приводит к разной величине поглощенной энергии, что может привести к распаду одних группировок элементов и возникновению новых.

Стоит отметить небольшую эффективность такого воздействия из-за малой величины объема облучаемого расплава, так как сфокусированный и расфокусированный лучи имеют малые диаметры, а воздействие осуществляется через поверхность расплавленного металла.

Известна электрогидроимпульсная обработка (ЭГИО) расплава, осуществляемая повторяющимися импульсами давления, которые возникают при высоковольтном пробое жидкости в электроразрядном генераторе упругих колебаний (ЭРГУК). Импульсы давления в расплав передаются через волновод ЭРГУК. Характерными особенностями ЭГИО являются высокая мгновенная мощность в импульсе и широкий спектр частот единичного импульса (от 0,1 до 100000 Гц) [28].

Электрическая энергия в течение (1 – 100) мкс выделяется в канале разряда – области между положительным электродом и внутренним торцом волновода ЭРГУК. В результате преобразования электрической энергии в тепловую вещество канала разряда превращается в низкотемпературную плазму ($4 \cdot 10^4$ К). Давление в канале разряда достигает 103 МПа. Канал разряда расширяется со скоростью, насчитывающей десятки и сотни метров в секунду, что вызывает появление сильной волны сжатия. Частота следования импульсов ограничена временем существования парогазовой полости, однако может быть существенно увеличена в ЭРГУК многоэлектродного типа. На формирование канала электрического разряда в разрядном промежутке ЭРГУК существенное влияние оказывает та среда, в которой производится высоковольтный разряд. Обычно, это техническая вода: диапазон проводимостей $(1-100) \cdot 10^{-2}$ (Ом·м)⁻¹. При высоковольтном электрическом разряде в воде реализуются четыре вида давлений. Это давление в канале разряда, давление на фронте волны сжатия, давление от торможения гидротока и гидростатическое.

В конечном итоге воздействие на технологическую среду сводится к созданию в нем мощного нестационарного акустического поля. Акустическое

поле вызывает кавитацию. При этом растворенный в расплаве газ выделяется в образующиеся несплошности, происходит коагуляция газовых включений, их удаление, рафинирование расплава от вредных примесей, интенсификация гидро- и массообменных процессов в объеме расплава и его гомогенизация [28].

К высокоэнергетическому воздействию на расплав можно также отнести активно развивающуюся в последние годы технологию обработки наносекундными электромагнитными импульсами (НЭМИ) жидкой фазы цветных металлов. НЭМИ образуют локальные поля высокой мощности и напряженности, тем самым создают условия для управления структурой и свойствами металлических расплавов [29]. Особенностью такого воздействия является создание однополярного импульса тока в качестве возбуждающего токового импульса. Длительность такого импульса составляет порядка 0,5-1 нс, а его мощность более 1 МВт, при частоте повторения 1000 Гц.

2.5 Электромагнитные способы воздействия на расплав

Одним из перспективных способов внешнего воздействия на расплав является наложение на жидкий и кристаллизующийся металл электрического и магнитного полей, позволяющих эффективно управлять движением расплава, процессами тепломассопереноса, структурой, свойствами и формой отливок [30 – 32].

Обработка расплава электрическим током. Электрический ток при воздействии на расплав металла оказывает кроме эффективного влияния на его движение, процессы тепломассопереноса, управления структурой и свойствами литых изделий, еще и одновременный прогрев отливки, что стабилизирует температурное поле по времени и в объеме, так как является внутренним источником энергии. Это приводит к снижению возможности образования дефектов в отливке.

В работах [33, 34] проведены исследования по влиянию электрического тока на структуру и свойства алюминиевых сплавов. Было установлено, что при пропускании тока через расплав возникает магнитное поле, которое создает силы, снижающие скорость движения макрообъемов расплава на границе раздела фаз. В результате это приводит к измельчению структуры металла отливки. Это объясняется тем, что затрудняется рост зерен из-за невозможности слияния более тугоплавких примесных и легирующих элементов, являющихся центрами кристаллизации. Кроме того, повышается скорость растворения металлических примесей и других элементов, которые также являются центрами кристаллизации.

Другим положительным эффектом при пропускании тока через расплав является его дегазация. Д.Л. Ловцов в работе [35] провел ряд исследований в этом направлении. Явление дегазации жидкого металла электрическим током служит подтверждением ионизации водорода в расплаве. При этом наблюдается неравномерное распределение водорода – у катода газонасыщение возрастает, а у анода падает. После отключения тока газосодержание выравнивается по всему объему расплава.

В работе [36] изучали влияние электрического тока на процесс кристаллизации сплава при литье в песчаные формы. Для непосредственного воздействия тока на расплав металла в момент его заливки в форму использовали последовательно расположенные контакты, примыкающие к отливке. Таким образом, достигалось действие тока на металл на всех этапах его кристаллизации. Воздействие тока на отливку, находящуюся в твердом состоянии, по завершении процесса кристаллизации и охлаждения ее до температуры $(0,2...0,5)T_{пл}$, приводит к дополнительному снижению механических напряжений, что равноценно операции отжига. Выбор плотности тока, пропускаемого по формируемой отливке, определяется фазовым состоянием ее материала. Максимальная плотность тока, пропускаемого в процессе кристаллизации материала, лимитируется

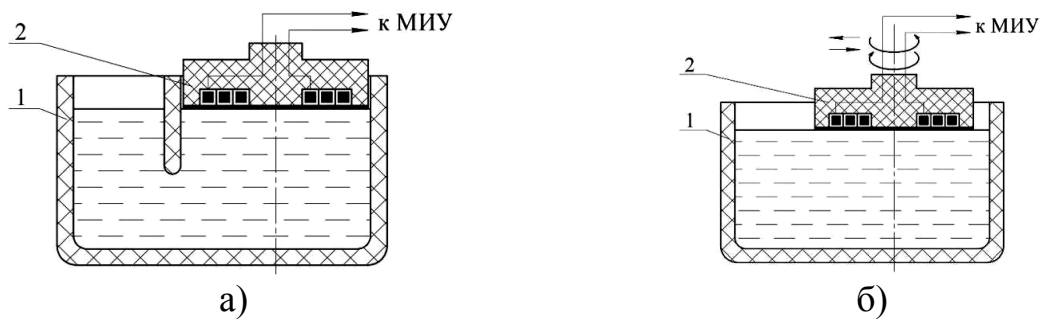
отсутствием возможности перехода твердой фазы в жидкую, а минимальная – условием зародышеобразования. Предел прочности образцов, полученных под воздействием электрического тока, повысился в среднем на 10%.

Таким образом, воздействие электрического тока существенно сокращает междендритное пространство и повышает дисперсность структуры, снижает содержание газов и неметаллических включений, улучшает условия растворения модификатора, что оказывает положительное влияние на механические свойства литого металла. Однако, при использовании установки, вырабатывающей электрический ток, возникают трудности по обеспечению равномерной обработки расплава, существует вероятность получения не полностью или неравномерно модифицированной структуры, особенно при получении массивных отливок сложной конфигурации.

2.6 Обработка расплава электромагнитными полями

Воздействие магнитного поля на металлические расплавы при плавке, заливке и кристаллизации изучали Л.А. Верте, В.А. Ефимов, И.Л. Матюшков, И.Л. Повх, Б.К. Чекин, В.П. Полищук, М.Р. Цин, В.И. Дубоделов, В.И. Добаткин, З.Н. Гецелев, И.А. Чернышов, Г.Е. Левшин, Р.К. Мысик, В.Д. Александров, В.И. Петренко и др. [37 – 60].

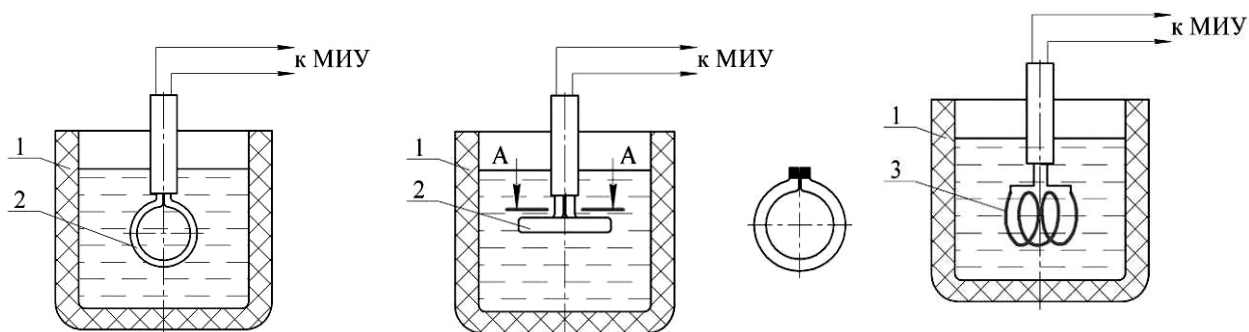
На рисунке 2.1 представлена технологическая схема осевого воздействия ИМП, на которой индуктор размещен непосредственно над поверхностью расплава металла. Он может быть неподвижным (рисунок 2.1, а) или совершать поступательные и вращательные движения (рисунок 2.1, б).



1 – тигель; 2 – плоский индуктор

Рисунок 2.1 – Технологические схемы магнитно-импульсной обработки с применением индукторов, размещенных непосредственно над поверхностью расплава металла

Погружные индукторы могут быть одно- и многовитковые (рисунок 2.2) в количестве одного или нескольких одновременно.



1 – тигель; 2 – одновитковый индуктор; 3 – многовитковый индуктор

Рисунок 2.2 – Технологические схемы магнитно-импульсной обработки металлического расплава погружными индукторами

Также возможны комбинированные схемы МИО с применением и наружных, и погружных индукторов. Различные варианты технологических схем могут быть получены изменением формы, размеров и месторасположения индукторных систем.

В работе [37] отмечается, что электромагнитное воздействие создает дополнительные конвективные потоки, которые обламывают ветви растущих дендритов и переносят их в расплав. При этом характер кристаллизации изменяется от последовательной к объемной, что приводит к увеличению количества центров кристаллизации и изменению характера макроструктуры.

Авторы работы [25] отмечают, что при кристаллизации алюминиевых сплавов с магнием и медью в магнитном поле с индукцией 0,5 – 1,0 Тл измельчается как макро-, так и микроструктура сплавов, а предел прочности возрастает на 30%.

На сегодняшний день разработан целый комплекс магнитогидродинамических устройств (МГД-устройства), создающих в металле отливки электромагнитные силы, которые позволяют эффективно управлять движением расплава, процессами тепломассопереноса, структурой, свойствами и формой отливок [25, 39 – 43]. В качестве примера можно привести электромагнитные перемешиватели и электромагнитные кристаллизаторы при непрерывном литье слитков, МГД-заливочные установки, которые широко используются при специальных видах литья. При непрерывном литье алюминиевых сплавов применяют МГД-заливочные установки на базе электромагнитных желобов с газовыми или электрическими камерными печами.

Для ванн легких сплавов, по мнению Л.А. Верте, более перспективными являются не серийные статорные электромагнитные перемешиватели, а электромагнитные перемешиватели погружного типа, состоящие из магнитного сердечника, обмотки и защитной футеровки [31]. Перемешиватель погружают в циркуляционную камеру с расплавом. При подаче электропитания в зоне действия электромагнита создаются пульсации металла, которые приводят к активному перемешиванию всего объема расплава в циркуляционной камере.

Общим недостатком погружных электромагнитных перемешивателей является необходимость решения проблемы выбора огнеупоров, способных защищать погружаемую в расплав электрическую часть установки от воздействия высокотемпературной и агрессивной среды. Кроме того, недостатком отечественного варианта этого типа устройств является неизбежное нарушение поверхностной окисной пленки, а зарубежного – возможность лишь порционной обработки расплава.

Специально для литейного производства были созданы МГД-лотки и МГД-насосы, принцип работы которых основан на взаимодействии тока, индуцированного в кольцевом канале с жидким металлом и внешнего магнитного поля [41]. Перемешивание осуществляется бегущим магнитным полем. Применение этого способа позволило увеличить более чем в два раза скорость растворения легирующих добавок (Cu, Si, и Mg), значительно сократить время достижения минимального температурного и концентрированного градиента в объеме ванны, повысить производительность печи до 30%. Кроме того, перелив металла с помощью того же МГД – лотка, как показал ряд исследований, дает возможность почти в три раза уменьшить содержание окиси алюминия и заметно, содержание водорода в готовых полуфабрикатах [31, 53].

Широкое использование нашел способ непрерывного литья алюминиевых сплавов в электромагнитные кристаллизаторы (ЭМК), который заменил способ литья в кристаллизатор скольжения. Жидкий металл в пульсирующем электромагнитном поле испытывает силовое воздействие, возникающее вследствие взаимодействия вихревых токов, наведенных в металле, с магнитным полем индуктора. В результате жидкий металл, находящийся под некоторым гидростатическим давлением, удерживается от растекания и отжимается в радиальном направлении от индуктора. Образующийся при этом столб жидкого металла повторяет форму индуктора и приобретает размеры, зависящие от интенсивности магнитного поля [50].

Литье в ЭМК принципиально отличается от других разновидностей литья слитков отсутствием контакта жидкого металла со стенками формы. Это создает возможность устранения ликвационных наплывов и неслитин, что приводит к значительному улучшению качества поверхности слитка. ЭМК позволяет получать изделия различной и достаточно сложной формы: круглые сплошные и полые слитки, плоские слитки, практически любых размеров [54, 55].

Разрабатываются способы обработки расплавов магнитным полем и при производстве фасонных отливок. Например, известно устройство для обработки расплава при заливке в литейную форму. Принцип работы такого устройства следующий. Расплав заливается в воронку и по мере его протекания по керамическому желобу, расположенному внутри конусной индуктивной катушки происходит обработка струи расплава магнитным полем, затем расплав попадает в литейную форму. Угол наклона катушки позволяет регулировать время протекания расплава по желобу и соответственно, интенсивность обработки магнитным полем. В процессе обработки расплава величина индукции магнитного поля B по оси катушки может меняться в интервале от 0,1 до 0,9 Тл [56].

2.7 Воздействие на расплав сильных магнитных полей

Возможность воздействия сильного импульсного магнитного поля на жидкий или кристаллизующийся металл затруднено по двум причинам:

- высокое электрическое сопротивление расплава металла снижает эффективность магнитно-импульсного воздействия;
- технические трудности создания и эксплуатации инструмента-индуктора.

Исследования показали высокую эффективность магнитно-импульсного воздействия на расплав [61 – 62].

При воздействии на расплав металла ИМП имеет место:

дополнительный разогрев расплава под действием внутренних источников энергии, возникающих из-за вихревых токов;

распространение в расплаве ударных волн, возникающих в результате действия давления ИМП;

развитие интенсивных металлопотокосов вследствие неравномерного распределения давления ИМП.

На рисунке 2.3 показаны основные факторы воздействия ИМП на жидкий и кристаллизующийся металл.

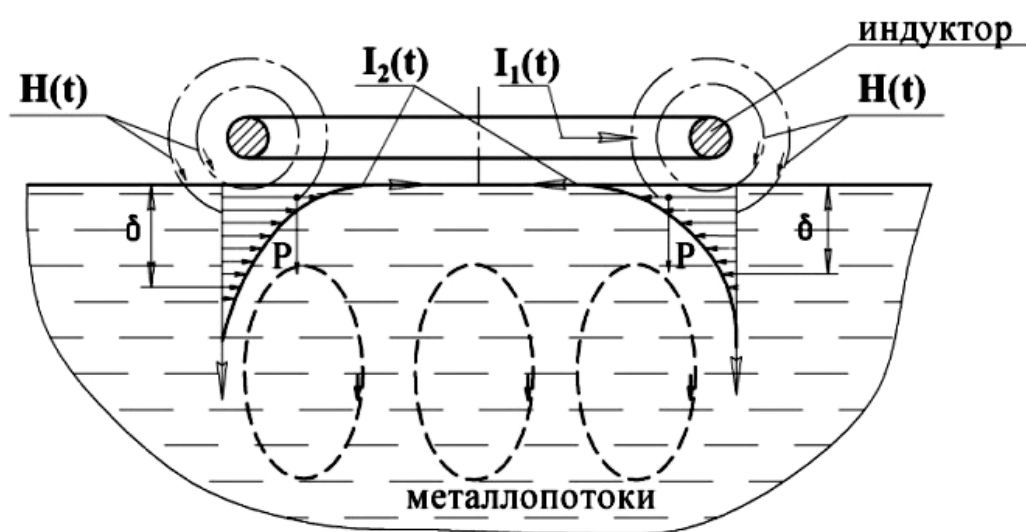


Рисунок 2.3 – Схема воздействия импульсных магнитных полей на жидкий и кристаллизующийся металл

Применительно для МИО металлических расплавов электромагнитные импульсы тока представляют собой синусоидальные затухающие сигналы с длительностью (t) $50 \div 500$ мкс и амплитудой тока (I_{max}) $10 \dots 100$ кА. Такое магнитно-импульсное воздействие на расплав может быть многократным (n), с временным интервалом между импульсами $0,5 \div 1$ секунды и более (рисунок 2.4) и оказывать давление (P) $1 \dots 10$ МПа. Скин-слой для обрабатываемых расплавов литейных алюминиевых сплавов системы Al-Si составляет от 1 до 5 мм.

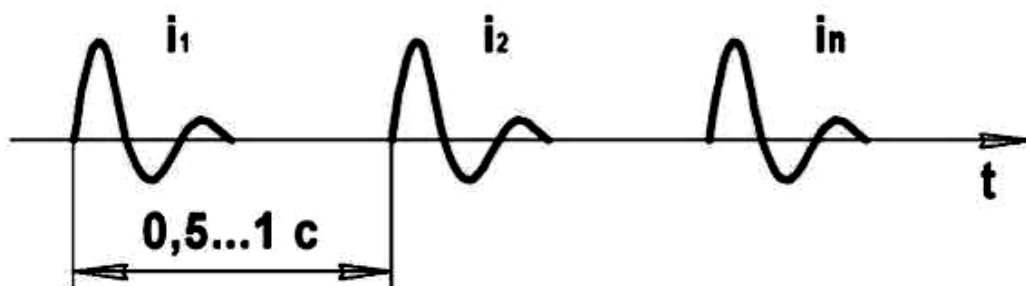


Рисунок 2.4 – Диаграмма импульсов разряда

Исходя из физики процесса была разработана технологическая схема для МИО расплава металла, как на предкристаллизационном этапе, так и на этапе кристаллизации. Возможна технологическая схема: воздействия магнитного поля на расплав через стенки магнитопрозрачного тигля.

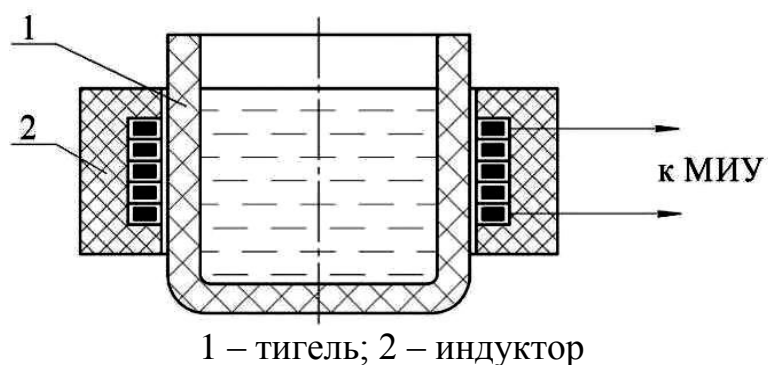
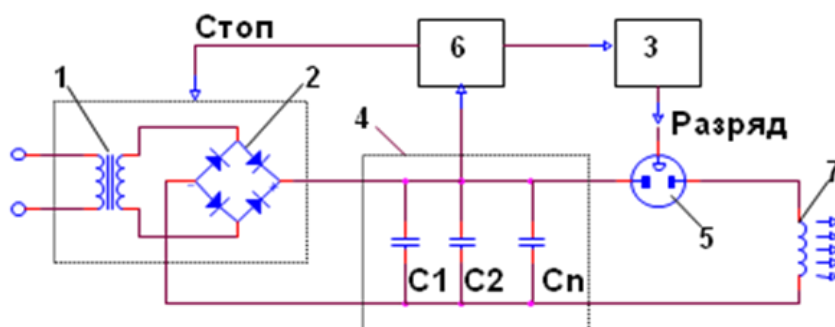


Рисунок 2.5 – Технологическая схема магнитно-импульсной обработки расплава через стенки магнитопрозрачного тигля

Для осуществления схемы применяются многовитковые индукторы, аналогичные индукторам для штамповки металлов магнитно-импульсным полем, но со стойкой изоляцией витков к высоким рабочим температурам. В этом случае тигель должен быть изготовлен из магнитопрозрачного материала.

Наружные индукторы могут быть как плоскими, так и цилиндрического типа: на «обжим» и на «раздачу». Такие индукторы широко используются в традиционных операциях магнитно-импульсной штамповки металлов.

Принципиальная схема установки с емкостным накопителем энергии показана на рисунке 2.6.



- 1 - повышающий трансформатор, 2 – выпрямитель,
 3- зарядное сопротивление, 4- батарея конденсаторов,
 5- электродный разрядник, 6- регулятор энергии, 7- индуктор

Рисунок 2.6 – Принципиальная схема МИУ

При включении установки в сеть батарея конденсаторов 4 с помощью зарядно-выпрямительного устройства, включающего в себя повышающий трансформатор 1, выпрямитель 2 и зарядное сопротивление 3, заряжается до заданного регулятором запасаемой энергии 6 напряжения. При достижении в батарее конденсаторов соответствующего напряжения на поджигающий электрод трех электродного разрядника 5 подается поджигающий импульс, инициирующий электрический пробой рабочего промежутка разрядника и коммутирующий разрядную цепь. Импульс разрядного тока, проходящий через индуктор 7, создает магнитное поле, которое оказывает теплосиловое воздействие на обрабатываемый объект из электропроводного материала.

Баланс энергии в эквивалентной схеме замещения разрядного контура МИУ для момента времени t оценивается выражением [63, 64]:

$$\frac{CU_0^2}{2} = \frac{CU^2(t)}{2} + \frac{L_n I^2(t)}{2} + \frac{1}{2} \int_0^t I^2 \frac{dL_n}{dt} dt + \frac{L_u I^2(t)}{2} + \frac{1}{2} \int_0^t I^2 \frac{dL_u}{dt} dt + \int_0^t R_n I^2 dt + \int_0^t R_u I^2 dt, \quad (2.1)$$

где U_0 и $U(t)$ – начальное и текущее значения напряжения на батарее конденсаторов МИУ; $I(t)$ – величина тока в разрядной цепи в момент времени t .

Величины, входящие в выражение (2.1), имеют следующий физический смысл.

Член, стоящий в левой части выражения, $\frac{CU_0^2}{2}$ – энергия емкостного накопителя при $t=0$, то есть рабочая энергия заряда батареи конденсаторов МИУ.

Правая часть выражения (2.1) описывает распределение этой энергии по отдельным элементам разрядной цепи в момент времени t :

$\frac{CU^2(t)}{2}$ – энергия емкостного накопителя в момент времени t ;

$\frac{L_n I^2(t)}{2}$ – магнитная энергия, запасаемая в собственной индуктивности МИУ (конденсаторы, ошиновка, разрядник) и в подводящем тракте;

$\frac{1}{2} \int_0^t I^2 \frac{dL_n}{dt} dt$ – кинетическая энергия, связанная с работой деформации элементов МИУ;

$\frac{L_u I^2(t)}{2}$ – магнитная энергия, запасаемая в системе «индуктор – обрабатываемый объект»;

$$\frac{1}{2} \int_0^t I^2 \frac{dL_u}{dt} dt$$

– кинетическая энергия, идущая на силовое воздействие на

обрабатываемый объект и индуктор;

$$\int_0^t R_n I^2 dt$$

– активные потери в элементах МИУ и подводящего тракта;

$$\int_0^t R_u I^2 dt$$

– активные потери в системе «индуктор – обрабатываемый объект».

Полезная работа по силовому воздействию на обрабатываемый объект описывается пятым членом правой части выражения (2.1). Поскольку изменение индуктивности L_u может происходить как за счет деформирования индуктора, так и объекта, то для повышения эффективности процесса необходимо предотвращать деформации индуктора, то есть конструкция индуктора должна обладать высокой прочностью и жесткостью. Для выполнения полезной работы используется часть магнитной энергии, запасаемой в системе «индуктор – обрабатываемый объект», определяемой четвертым членом правой части выражения (2.1).

Остальные члены выражения описывают потери энергии в элементах разрядной цепи и, следовательно, должны иметь минимальную величину.

Анализ второго члена выражения еще раз подтверждает сделанный ранее вывод о том, что необходимо стремиться к снижению собственной индуктивности МИУ и подводящего тракта.

Снижение величины третьего члена требует повышения прочности и жесткости элементов разрядной цепи МИУ и подводящего тракта, с целью исключения их деформаций.

Шестой член выражения показывает, что необходимо снижать активные потери в элементах МИУ и подводящего тракта.

Из анализа седьмого члена следует, что эффективность процесса повышается по мере повышения электропроводности материала индуктора и заготовки.

Проведенный анализ позволяет сделать ряд рекомендаций:

1. Более эффективны установки с батареей конденсаторов меньшей ёмкости, то есть более высоковольтные.

2. Необходимо сводить к минимуму активные потери в разрядном контуре.

3. Оптимальным является такое соотношение параметров разрядной цепи, при котором разрядный ток изменяется по закону затухающей синусоиды.

4. Следует снижать индуктивность установки и подводящего к индуктору тракта (L_n).

5. Максимальная доля энергии, запасенная в батарее конденсаторов МИУ, выделяется в системе «индуктор – обрабатываемый объект», если индуктивность индуктора в 4-9 раз превышает индуктивность МИУ и подводящего тракта.

На основании выше изложенного можно отметить ряд особенностей МИО:

- Электродинамические силы, воздействующие на проводящую среду, имеют объемный характер;

- Эффективность силового воздействия на обрабатываемый объект тем выше, чем выше электропроводность материала заготовки и частота колебаний разрядного тока в индукторе.

2.8 Воздействие на расплав слабых импульсов тока

Воздействием слабыми импульсами тока радиочастотного диапазона можно управлять процессами диффузии и кристаллизации и, в конечном

счете, оказывать влияние на структуры и свойства литых и деформируемых изделий. Теоретические основы процесса объясняют ряд авторов [65, 66].

По данным современных исследований жидкая, предкристаллизационная фаза вещества представляет собой сложную гетерогенную композицию различных по размеру и составу надмолекулярных структур (НМС), содержащих от нескольких единиц, до сотен тысяч молекул. Флуктуирующие размеры, расстояния и силы взаимодействия НМС, их поверхностная энергия - это все энергоемкие параметры, которые варьируются в процессах и зонах фазовых превращений и химических реакций. А это - потенциальная возможность раскачки колебательно-вращательных движений НМС или их цепочек. Причем, если оценить размеры, массы и моменты инерции НМС, то собственные частоты таких движений оказываются в кило- и мегагерцевой области радиочастотного диапазона. На фоне управляющего акустического воздействия волны этих движений самоподдерживаются и синхронизируются. Волны согласованных движений НМС без затухания распространяются конвективным сносом именно туда, где помимо самих структур есть источники питания, т.е. вдоль границ фазовых и химических превращений - в акустический волновой канал.

Согласование, коллективизация движений в канале - причина скачкообразного переброса внутренней энергии на расстояние, превышающие среднюю длину пробега фононов, т.е. возникает своеобразный тепловой пробой: быстрое выравнивание температур в широких пространственных пределах. А значит - сближение скоростей кристаллизации по объему и получение слитка с равновесной структурой. Основное возражение, неверие в возможность управления мощными процессами посредством слабых сигналов опирается на традиционную убежденность в том, что энергия команды должна быть сопоставима с энергией объекта воздействия, хотя реально постоянно отвергает этот тезис.

Суть способа слабого акустического воздействия состоит в следующем: в непосредственно примыкающую к среде влияния короткозамкнутую гальваническую петлю-антенну (магнитный диполь) от маломощного генератора ($\sim 10\text{В} \cdot \text{А}$) подаются слабые электрические импульсы тока характерной для данного процесса формы, периодичности и скважности [67].

Импульсный электроток создает поперечное пульсирующее магнитное поле и формирует в скин-слое антенны нормальные волны акустических продольных колебаний с характерным или выбранной формы импульсов набором гармоник, т.е. происходит процесс электромагнитного акустического преобразования ЭМАП (рисунок 2.7).

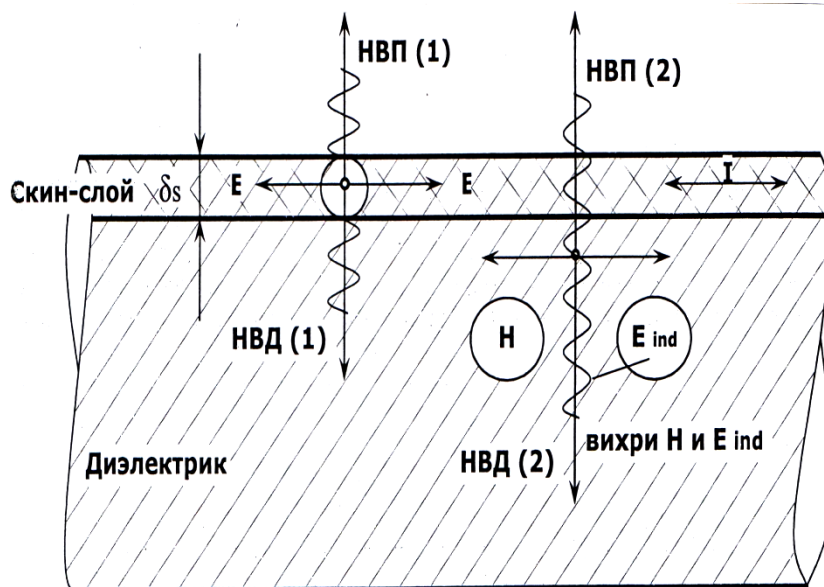
Акустические волны беспрепятственно и с большой скоростью распространяются в среде влияния, оказывая воздействие на скорость протекания процессов. Частота следования электромагнитных импульсов, подаваемых в петлю - антенну, лежит в радиодиапазоне от единиц до тысяч килогерц и определяется экспериментально по максимальной эффективности.

Наиболее эффективна с точки зрения получения мелкого зерна схема литья способом погружения.

Такая компоновка даст возможность увеличить скорость охлаждения расплава, получить равную по сечению мелкозернистую структуру.

Способ «погружение» открывает совершенно новые возможности, поскольку нет большого различия в условиях получения простых и сложных профилей. Этот способ делает широкодоступным изделия из металлов сложного профиля типа продольноорезанные трубы и другие профильные изделия. Такие изделия в настоящее время изготавливаются давлением из больших слитков (прокаткой, прессованием и т.п.) с применением мощного сложного, дорогостоящего оборудования, больших энергетических затрат на деформирование металла.

Технология литья «погружением» позволяет получать высококачественные отливки с плотной мелкозернистой структурой.

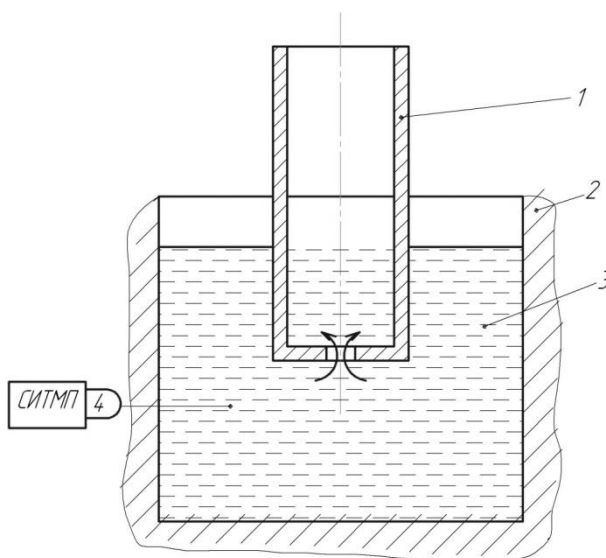


E - напряженность электрического поля, I – ток, H - напряженность магнитного поля, НВП(1) – нормальная акустическая волна в проводнике, созданная в скин-слое толщиной δS , НВД(1) – нормальная акустическая волна в диэлектрике, НВП(2)—акустическая волна в проводнике, созданная в диэлектрике, НВД(2) – акустическая волна в диэлектрике, возникающая под действием первичной напряженности H , E_{ind} – индуцированное электрическое поле

Рисунок 2.7 – Электромагнитно - акустическое преобразование

Технологический процесс разработан в 90-е годы. Главными достоинствами отливок, получаемых по этой технологии, является высокая плотность, герметичность и точность. Подобные свойства позволяют использовать их в узлах и агрегатах с повышенными требованиями к прочности и сроку службы.

Отличительная особенность технологии заключается в том, что заливка расплавленного металла в форму ведется в направлении снизу вверх (через питатели), а начинающееся после заливки одностороннее затвердевание направлено сверху вниз. При этом формирование отливки происходит направленно при большом градиенте температур. В ходе процесса осуществляется постоянная подпитка фронта кристаллизации перегретым металлом. Это приводит к получению мелкого зерна и отсутствию усадочной пористости в отливках. Получаемые отливки имеют высокую плотность, достичь которую не позволяет ни литье под давлением, ни другие способы литья.

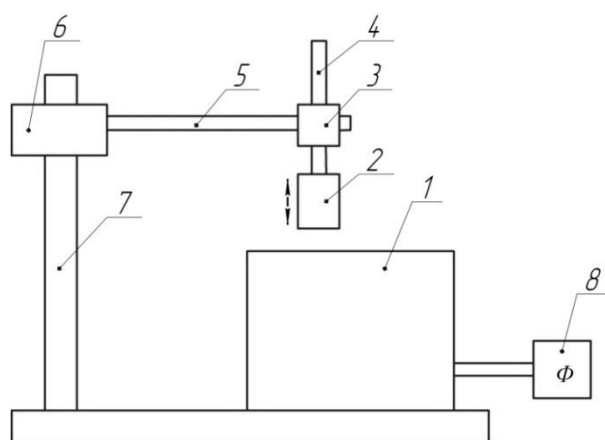


1 – оснастка, 2 – кокиль, 3 – расплав,
4 – формирователь слабых импульсов тока

Рисунок 2.8 – Схема литья способом погружения

Для подвода расплавленного металла в полость литейной формы (кокиля) не требуется специальной литниково-питающей системы (ЛПС), достаточно простых питателей небольшого сечения. За счет отсутствия ЛПС

достигается экономия 30-40% жидкого металла, идущего на изготовление отливки. Схема технологической установки представлена на рисунке 2.9.



1 – печь сопротивления, 2- водоохлаждаемый кокиль,
3 – механизм подъема-опускания кокиля, 4 – шток, 5 – консоль,
6 – механизм поворота консоли с кокилем, 7 – стойка, 8 – формирова-
тель

Рисунок 2.9 – Схема установки литья погружением

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Специальные способы литья. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.uzcm.ru/spravka/tech/prod/5.php> (дата обращения: 14.07.13)
- 2 Морин, С.В. Комплексное исследование вибрационного воздействия на кристаллизацию и свойства отливок из алюминиевых сплавов [Текст]: автореф. дис. канд. техн. наук / Морин Сергей Викторович. - ГОУ ВПО «СибГИУ». – Новокузнецк, 2005. – 22 с.
- 3 Ефимов, В.А. Физические методы воздействия на процессы затвердевания сплавов [Текст] / В.А. Ефимов, А.С. Эльдарханов. – М.: Металлургия, 1995. – 272 с.
- 4 Чернега, Д.Ф. Газы в цветных металлах и сплавах [Текст] / Д.Ф. Чернега, О.М. Бялик, Д.Ф. Иванчук, Г.А. Ремизов. – М.: Металлургия, 1982. – 176 с.
- 5 Найдек, В.Л. Влияние способа обработки расплава на структуру и свойства алюминиевых сплавов [Текст] / В.Л. Найдек, А.В. Наривский // Литейное производство. - 2003. - №9. - С. 2-3.
- 6 Селянин, И.Ф. Рафинирование расплавов при использовании низкосортной шихты [Текст] / И.Ф. Селянин, В.Б. Деев, А.П. Войтков, Н.В. Башмакова // Литейщик России. - 2006. - №2. - С. 18-20.
- 7 Крушенко, Г.Г. Доэвтектические сплавы системы Al-Si, приготовленные из шихты, обработанной физическими методами [Текст] / Г.Г. Крушенко // Литейное производство. - 1983. - №8. - С. 10, 11.
- 8 Миненко, Г.Н. Об энергетическом воздействии на металлический расплав [Текст] / Г.Н. Миненко // Металлургия машиностроения. - 2006. - №3. - С. 10-12.

- 9 Эльдарханов, А.С. Кавитационное разрушение границы затвердевания [Текст] / А.С. Эльдарханов // Процессы литья. - 1996. - №3. - С. 16-24.
- 10 Найдек, В.Л. Влияние вибрации на структуру и свойства алюминиевого сплава АК5М2 [Текст] / В.Л. Найдек, А.С. Эльдарханов, А.С. Нурадинов, Е.Д. Таранов // Литейщик России. - 2005. - №10. - С. 23-25.
- 11 Зуев, А.Б. К истории процесса литья в твердожидком состоянии [Текст] / А.Б. Зуев // Литейное производство. - 2003. - №4. - С. 20-23.
- 12 Юдин, С.Б. Центробежное литье [Текст] / С.Б. Юдин, М.М. Левин, С.Е. Розенфельд. – М.: Машиностроение, 1972. – 280 с.
- 13 Курдюмов, А.В. Фильтрование и флюсовая обработка алюминиевых расплавов [Текст] / А.В. Курдюмов, С.В. Инкин, В.С. Чулков. – М.: Metallurgy, 1980.
- 14 Добаткин, В.И. Ультразвуковая обработка расплава цветных металлов и сплавов [Текст] / В.И. Добаткин, Г.И. Эскин. - М.: Наука, 1986. – С. 6.
- 15 Шоршоров, М.Х. Теория неравновесной кристаллизации плоского слитка [Текст] / М.Х. Шоршоров, А.И. Манохин. - М.: Наука, 1992. – С. 6-22.
- 16 Баум, Б.А. О взаимосвязи свойств жидких и твердых сталей [Текст] / Б.А. Баум, Г.В. Тягунов // Проб. стального слитка. – 1976. - №6. – С.37.
- 17 Крушенко, Г.Г. Модифицирование алюминия при литье крупногабаритных слитков прутковыми лигатурами [Текст] / Г.Г. Крушенко, В.А. Балашов, З.А. Василенко // Цветные металлы. - 1989. - №2. - С. 91, 92.
- 18 Крушенко, Г.Г. Повышение механических свойств алюминиевых литейных сплавов с помощью УДП [Текст] / Г.Г. Крушенко, В.А. Балашов, З.А. Василенко // Литейное производство. - 1991. - №4. - С. 17, 18.

- 19 Деев, В.Б. Получение герметичных алюминиевых сплавов из вторичных материалов [Текст] / В.Б. Деев. – М.: Флинта: Наука, 2006. – 218 с.
- 20 Ершов, Г.С. Высокопрочные алюминиевые сплавы на основе вторичного сырья [Текст] / Г.С. Ершов, Ю.Б. Бычков. – М.: Metallurgia, 1979. – 192 с.
- 21 Деев, В.Б. Влияние структурной наследственности шихты на качество отливок из силуминов [Текст] / В.Б. Деев, И.Ф. Селянин, А.В. Феоктистов, Ю.Ф. Шульгин // Заготовительные производства в машиностроении. - 2003. - №2. - С. 4-6.
- 22 Пыцзе, Ли. Исследование наследственного влияния структуры шихты и перегрева расплава на структуру силуминов [Текст] / Ли Пыцзе, В.И. Никитин, К.В. Никитин // Литейное производство. - 2001. - №5. - С. 15-16.
- 23 Котляровский, Ф.М. Качество отливки после термовременной обработки алюминиево-кремниевых расплавов [Текст] / Ф.М. Котляровский, В.И. Белик // Литейное производство. - 1985. - №6. - С. 17-20.
- 24 Таран, Ю.Н. Влияние термоскоростной обработки жидкого расплава АК2 на свойства отливок [Текст] / Ю.Н. Таран, И.А. Новохатский, В.И. Мазур // Литейное производство. - 1985. - №7. - С. 16.
- 25 Ефимов, В.А. Специальные способы литья [Текст]: Справочник / В.А. Ефимов, Г.А. Анисович, В.Н. Бабич. – М.: Машиностроение, 1991. – 436 с.
- 26 Батышев, А.И. Кристаллизация металлов и сплавов под давлением [Текст] / А.И. Батышев. – М.: Metallurgia, 1977. – 155 с.
- 27 Перелома, В.А. Лазерное воздействие на жидкое и жидкотвердое состояние алюминиевых сплавов [Текст] / В.А. Перелома, В.П. Лихошва // Литейное производство. - 1992. - №9. - с.8.

28 О низкоэнергетической технологии электрогидроимпульсной обработки расплава в ковше на предразливочной стадии [Электронный ресурс] / http://www.iipt.com.ua/news/news_5.htm

29 Ри, Э.Х. Влияние облучения жидкой фазы наносекундными электромагнитными импульсами на ее строение, процессы кристаллизации, структурообразования и свойства литейных сплавов [Текст] / Э.Х. Ри, Хосен Ри, С.В. Дорофеев, В.И. Якимов. – Владивосток: Дальнаука, 2008. – 177 с.

30 Верте, Л.А. Магнитная гидродинамика в металлургии [Текст] / Л.А. Верте. - М.: Металлургия, 1975. 288 с.

31 Верте, Л.А. Электромагнитная разливка и обработка жидкого металла [Текст] / Л.А. Верте. -. М.: Металлургия, 1967. 206 с.

32 Самойлович, Ю.А. Кристаллизация слитка в электромагнитном поле [Текст] / Ю.А. Самойлович.- М.: Металлургия, 1986. 168 с.

33 Дорофеев, А.В. Обработка алюминиевых расплавов электротокком [Текст] / А.В. Дорофеев, А.Б. Килин, А.С. Тertiшников // Литейщик России. - 2002. - №2. - с. 19-21.

34 Килин, А.Б. Влияние электрического тока на дегазацию и модифицирование алюминиевых сплавов [Текст] / А.Б. Килин // Литейное производство. – 2002. - №8. – с. 21-22.

35 Якимов, В.И. Влияние постоянного тока на качество магниевого сплава [Текст] / В.И. Якимов, В.И. Шпорт, В.И. Муравьев, А.Т. Калинин, А.В. Якимов // Литейное производство. - 1999. - №12. - с. 10-12.

36 Тимченко, С.Л. Влияние электрического тока на кристаллизацию алюминиевого сплава [Текст] / С.Л. Тимченко, Н.А. Задорожный // Литейное производство. - 2005. - №9. - с. 12-13.

37 Груздева, И.А. Влияние электромагнитного перемешивания на структуру и свойства оловянных бронз [Текст] / И.А. Груздева, А.В. Сулицин, Р.К. Мысик, Б.А. Сокунов // Литейщик России. - 2006. - №11. - С. 27-29.

- 38 Любимов, А.А. Электромагнитный способ получения слитков [Текст] / А.А. Любимов, А.С. Тертишников // *Металлургия машиностроения*. - 2004. - №4. - С. 32-36.
- 39 Лычев, А.П. Кристаллизация металлов во внешнем магнитном поле [Текст] / А.П. Лычев, А.И. Черемисин // *Изв. вузов. Черная металлургия*. - 1978. - №11. - С. 158-161.
- 40 Микельсон, А.Э. МГД-методы и устройства в промышленности [Текст] / А.Э. Микельсон, В.М. Фолифоров // *Магнитная гидродинамика*. - 1975. - №1. - С. 129-140.
- 41 Горшков, А.А. Применение однофазных электромагнитных насосов в литейном производстве [Текст] / А.А. Горшков, В.П. Полищук, М.Р. Цин // *Литейное производство*. - 1962. - №8. - С. 9.
- 42 Полищук, В.П. Заливка чугуна магнитодинамическими насосами в условиях массового изготовления гильз тракторных двигателей [Текст] / В.П. Полищук, В.К. Погорский, В.Ф. Злобин, П.И. Загоровский // *Литейное производство*. - 1981. - №8. - С. 23-24.
- 43 Основные понятия магнитной гидродинамики. МГД-устройства и МГД-установки [Текст]: терминология. Вып. 100. – М.: Наука, 1982. – 47 с.
- 44 Повх, И.Л. Магнитная гидродинамика в металлургии [Текст] / И.Л. Повх, А.Б. Капуста, Б.В. Чекин. – М.: Металлургия, 1974. - 240 с.
- 45 Полищук, В.П. Магнитодинамические насосы для литейного производства [Текст] / В.П. Полищук // *Литейное производство*. - 1978. - №2. - С. 29-31.
- 46 Дубоделов, В.И. Влияние переменного магнитного поля на диффузию в жидком алюминии [Текст] / В.И. Дубоделов, С.М. Захаров, В.Ф. Мазанко, В.М. Миронов, А.В. Миронов // *Материаловедение*. - 2003. - №12. - С. 27-29.

47 Левшин, Г.Е. Формообразование намагниченными формовочными материалами [Текст] / Г.Е. Левшин. – Барнаул: Изд-во «АлтГТУ», 2001. – 368 с.

48 Левшин, Г.Е. Литье в магнитные формы [Текст] / Г.Е. Левшин, И.Л. Матюшков. – Барнаул: Изд-во «АлтГТУ», 2006. – 688 с.

49 Полищук, В.П. Электромагнитное транспортирование и заливка в формы жидкого металла при фасонном литье магниевых сплавов [Текст] / В.П. Полищук, М.Р. Цин, В.И. Дуболелов, А.С. Зенкин // Литейное производство. - 1968. - №12. - С. 13-16.

50 Гецелев, З.Н. Непрерывное литье в электромагнитный кристаллизатор [Текст] / З.Н. Гецелев, Г.А. Балахонцев, Ф.И. Квасов, Г.В. Черепок, И.И. Варга, Г.И. Мартынов. – М.: Metallurgia, 1983. – 152 с.

51 Мочалов, П.П. Литье в электромагнитные кристаллизаторы [Текст] / П.П. Мочалов, З.Н. Гецелев // Цветные металлы. - 1970. - №8. - С. 62-63.

52 Горшков, А.А. Применение однофазных электромагнитных насосов в литейном производстве [Текст] // А.А. Горшков, В.П. Полищук, М.Р. Цин // Литейное производство. - 1962. - №8. - С. 9.

53 Герман, Э. Непрерывное литье [Текст] / Э. Германн. – М.: Metallurgizdat, 1961. – 814 с.

54 Гецелев, З.Н., Мартынов Г.И. О механизме образования полосчатой структуры непрерывных слитков [Текст] / З.Н. Гецелев, Г.И. Мартынов // Технология легких сплавов. - 1982. - №2. - С. 45-49.

55 Балахонцев, Г.А. О качестве поверхности слитков при литье в электромагнитный кристаллизатор [Текст] / Г.А. Балахонцев, В.И. Добаткин, Н.М. Зубова, Р.М. Сизова // Цветные металлы. - 1976. - №3. - С. 47-49.

56 Деев, В.Б. Модифицирующая обработка сплавов магнитным полем [Текст] / В.Б. Деев, И.Ф. Селянин, О.И. Нохрина, В.Ф. Горюшкин, С.А. Цецорина // Литейщик России. -2008. -№ 3. -С. 23–25.

57 Вялов, Б.В. Влияние магнитно-импульсной обработки на физико-механические свойства бинарных сплавов системы Al-81 [Текст]/ Б.В. Вялов, В.И. Никитин, К.В. Никитин, Д.Г. Черников// Актуальные проблемы современной науки: Материалы 2-го международного форума. - Самара, - 2006. - С. 84-89.

58 Glouschenkov, V.A. Forming of structure and properties of multi-phase alloys under action of a high-intensity pulsed-magnetic field [Текст]/ V.A. Glouschenkov, A.Ju. Igolkin, D.G. Chernikov, V.I. Nikitin, B.V. Vyalov // «Multi-phases and multi-components materials under dynamic loading»: Materials of 10th European Mechanics of Materials Conference/ - Kazimierz Dolny, Poland, - 2007. P479-485.

59 Глущенко, В.А. Влияние импульсного магнитного поля высокой напряженности на свойства жидких алюминиевых сплавов [Текст]/ В.А. Глущенко, Ф.В. Гречников, В.И. Никитин, Д.Г. Черников, А.Ю. Иголкин, К.В. Никитин, А.А. Поздняков //Литейщик России. - 2010. - № 7. - С. 34-39.

60 Глущенко, В.А. О воздействии импульсных магнитных полей на расплавы [Текст]/ Глущенко В.А., Черников Д.Г., Никитин В.И., Никитин К.В. // Металлургия машиностроения. - 2012. - №4. - С. 47-50.

61 Лякишев, Н.П., Получение и физико-механические свойства объемных нанокристаллических материалов. [Текст]/ Н.П. Лякишев, М.И. Алымов М.: ЭЛИЗ, 2007. -148с.

62 Ри, Э.Х. Влияние облучения жидкой фазы наносекундными электромагнитными импульсами на ее строение, процессы кристаллизации, структурообразования и свойства литейных сплавов [Текст] / Э.Х. Ри, Хосен Ри, СВ. Дорофеев, В.И. Якимов. -Владивосток: Дальнаука, 2008. - 177 с.

63 Копылов, В.И. Предел измельчения зерен при равноканальной угловой деформации [Текст] / В.И. Копылов, В.Н. Чувильдеев // Металлы. 2004. №1. С.22-35.

64 Белый, И.В. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов [Текст] / И.В. Белый, С.М. Фертик, Л.Т. Хищенко. – Харьков: Вища школа. 1970. – 190 с.

65 Зарембо, В.И. Фоновое электромагнитно-акустическое управление структурными и пластическими свойствами металлических материалов [Текст] / В.И. Зарембо, А.А. Колесников, Е.В. Иванов // Известия РАН, Сер. Физич. -2006. -Т.70, -№8.- С. 1088-1091.

66 Зарембо, В.И. Фоновое резонансно-акустическое управление гетерофазными процессами [Текст]/ Зарембо В.И., Колесников А.А.//Теоретические основы химической технологии.-2006.- Т.40,№5.-С.520-532.

67 Бибииков А.О., А.М. Управление структурообразованием и свойствами литых материалов слабым акустическим воздействием [Текст] / А.М. Бибииков, И.П. Халтурия, В.И. Зарембо // Литейное производство. - 2007. - №5.-С. 12-14.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»
(СГАУ)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЛИТЬЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ С
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

Электронные методические указания
к лабораторным работам

Самара
2013

УДК 662.2.8
Г 665

Автор-составитель: **Гречников Федор Васильевич**

Исследование процессов литья алюминиевых сплавов с электромагнитным воздействием [Электронный ресурс]: электрон. метод. указания к лаб. работам / Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т); авт.-сост. Ф.В. Гречников. - Электрон. текстовые и граф. дан. (3,75 Мбайт). - Самара, 2013.

Рассмотрены механизмы воздействия электромагнитных источников на структурообразование алюминиевых сплавов при литье.

Указания предназначены для студентов инженерно-технологического факультета, обучающихся по магистерской программе «Структурирование сплавов до наноуровневого размера в металлургических циклах с применением инновационных технологий способов литья и обработки металлов давлением с воздействием электромагнитных источников» для дисциплины «Инновационные процессы литья, основанные на гибридных технологиях с воздействием электромагнитных источников» в В семестре.

Подготовлено на кафедре обработки металлов давлением.

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2013

СОДЕРЖАНИЕ

1	Влияние тензиомпульсного давления от слабых токов на структуру алюминиевого сплава при литье по способу жидкостной штамповки	4
2	Влияние тензиомпульсного давления от слабых токов на структуру алюминиевого сплава при литье по способу погружения	15

1 Влияние тензоимпульсного давления от слабых токов на структуру алюминиевого сплава при литье по способу жидкостной штамповки

Цель работы: Исследовать процесс жидкостной штамповки с различным по частоте тензоимпульсным давлением.

Задачи:

1. Выявить механизм процесса жидкостной штамповки.
2. Выявить механизм влияния тензоимпульсного давления на процесс кристаллизации.
3. Установить величину оптимальной частоты тока на структуру сплава.

Механизм процесса жидкостной штамповки

Наиболее эффективным, как с точки зрения получения мелкого зерна, так и высоких физико-механических и эксплуатационных свойств является литье под давление в штамповой оснастке – жидкостное прессование. Наличие высоких скоростей охлаждения в инструментальной штамповой оснастке является предпосылкой получения более мелкого зерна в литой заготовке, тем более, если она имеет форму листа или плиты.

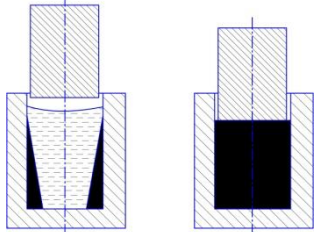
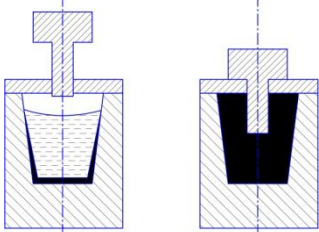
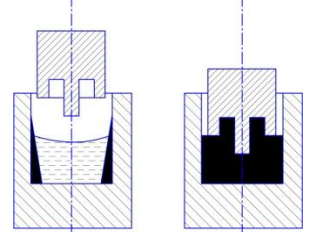
Отливки изготавливают в формах (пресс-формах, штампах), состоящих из пуансона (прессующего узла), матрицы, толкателей и съемников. Верхнюю плиту с закрепленными на ней деталями прессующего узла монтируют на ползуне пресса, а нижнюю плиту с размещенными на ней матрицей и механизмом выталкивания отливки на столе пресса.

Процесс заключается в том, что расплав под действием собственной силы тяжести заливают в матрицу, затем пуансоном осуществляют окончательное оформление контуров отливки и последующее ее уплотнение (выдержку давлением) до окончательного затвердевания. После извлечения из пресс- формы (ПФ) отливку можно подвергать различным видам последующей обработки (термической или механической).

Способом ЛКД изготавливают простые и сложные по конфигурации заготовки из чистых металлов и сплавов на основе алюминия, железа, магния, меди и цинка, используя для этой цели как специализированные, так и неспециализированные гидравлические прессы и машины.

Различают следующие схемы процесса ЛКД (таблица 1.1): 1-под поршневым давлением (поршневое прессование); 2 - под пуансонным давлением (пуансонное прессование); 3 - под пуансонно-поршневым давлением (пуансонно-поршневое или комбинированное прессование).

Таблица 1.1 – Классификация схем прессования ЛКД

Группа (схема)		
1	2	3
Поршневое прессование	Пуансонное прессование	Пуансонно-поршневое прессование
		

Важным критерием, характеризующим каждую схему процесса ЛКД, является отношение объема не затвердевшего сплава $V_{нс}$, вытесненного пуансоном во время окончательного оформления контуров отливки ко всему объему $V_{от}$: $K_f = V_{нс} / V_{от}$. В зависимости от схемы ЛКД коэффициент формообразования K_f может изменяться от нуля до единицы.

При поршневом прессовании давление кристаллизующемуся расплаву передается через пуансон, перекрывающий открытую полость матрицы и действующий на верхний торец формирующейся отливки в течение времени, необходимого для ее затвердевания. К моменту приложения давления в местах соприкосновения расплава с матрицей образуется корка, а уровень сплава в матрице понижается вследствие объемной усадки. Поэтому пуансон

(поршень) воздействует вначале на вертикальную корку, а после соприкосновения с не затвердевшим сплавом на всю отливку.

Формообразование отливки при поршневом прессовании практически полностью осуществляется во время свободной заливки расплава в матрицу. Основная масса расплава при контакте с пуансоном перемещается (за исключением верхней части) при понижении уровня во время уплотнения затвердевающей отливки, т.е. $K_f=0$.

Площадь проекции пуансона при поршневом прессовании в большинстве случаев соответствует площади проекции отливки, а следовательно, и рабочей полости матрицы. Можно использовать пуансон, площадь прессующей части которого меньше максимальной площади проекции отливки, для чего необходимо применение ПФ с разъемными матрицами.

При прессовании под действием выступающей рабочей части пуансона не затвердевший сплав выдавливается вверх до полного заполнения рабочей полости ПФ. Особенностью этой схемы является то, что пуансон вначале соприкасается с расплавом, удаленном от боковых стенок матрицы, и вытесняет его выше уровня заливки. Пуансон не соприкасается с вертикальной коркой, образовавшейся до его внедрения в расплав. Таким образом, формообразование отливки частично происходит при заливке расплава в матрицу и выдержке его в матрице до подхода пуансона, а заканчивается после внедрения пуансона в кристаллизующий расплав. При этом $K_f=0,1...0,7$.

Когда формообразование окончено, давление передается только на внутреннюю поверхность отливки или одновременно на верхний торец и внутреннюю поверхность отливки. При пуансонном прессовании проекция прессующей части пуансона может быть меньше максимальной площади проекции отливки или равна ей.

При пуансонно-поршневом (комбинированном) прессовании формообразование отливки частично осуществляется во время заливки расплава в матрицу и выдержке его в ней до соприкосновения с пуансоном, а заканчивается после вытеснения части не затвердевшего сплава в полости, ограниченные пуансоном и расположенные выше уровня заливки расплава в матрицу. Перемещение не затвердевшего сплава происходит как при сжатии вертикальной корки, так и при выдавливании его вверх выступающими элементами пуансона.

Это способ открывает совершенно новые возможности, поскольку нет большого различия в условиях получения простых и сложных профилей. Этот способ делает широкодоступным изделия из металлов сложного профиля типа продольнооребрёные трубы и другие профильные изделия. Такие изделия в настоящее время изготавливаются давлением из больших слитков (прокаткой, прессованием и т.п.) с применением мощного сложного, дорогостоящего оборудования, больших энергетических затрат на деформирование металла.

Воздействием слабыми импульсами тока радиочастотного диапазона можно управлять процессами диффузии и кристаллизации и, в конечном счете, оказывать влияние на структуры и свойства литых и деформируемых изделий. Теоретические основы процесса объясняют ряд авторов.

По данным современных исследований жидкая, предкристаллизационная фаза вещества представляет собой сложную гетерогенную композицию различных по размеру и составу надмолекулярных структур (НМС), содержащих от нескольких единиц, до сотен тысяч молекул. Флуктуирующие размеры, расстояния и силы взаимодействия НМС, их поверхностная энергия- это все энергоёмкие параметры, которые варьируются в процессах и зонах фазовых превращений и химических реакций. А это - потенциальная возможность раскачки колебательно-вращательных движений НМС или их цепочек. Причем, если

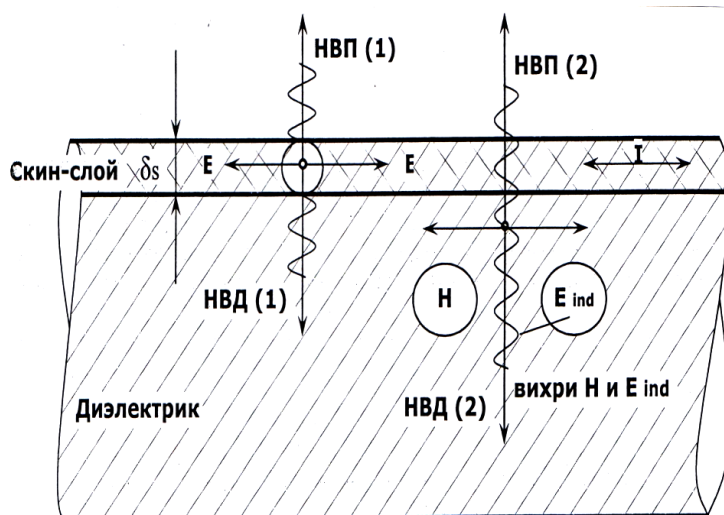
оценить размеры, массы и моменты инерции НМС, то собственные частоты таких движений оказываются в кило- и мегагерцевой области радиочастотного диапазона. На фоне управляющего акустического воздействия волны этих движений самоподдерживаются и синхронизируются. Волны согласованных движений НМС без затухания распространяются конвективным сносом именно туда, где помимо самих структур есть источники питания, т.е. вдоль границ фазовых и химических превращений - в акустический волновой канал.

Согласование, коллективизация движений в канале - причина скачкообразного переброса внутренней энергии на расстояние, превышающее среднюю длину пробега фононов, т.е. возникает своеобразный тепловой пробой: быстрое выравнивание температур в широких пространственных пределах. А значит - сближение скоростей кристаллизации по объему и получение слитка с равновесной структурой. Основное возражение, неверие в возможность управления мощными процессами посредством слабых сигналов опирается на традиционную убежденность в том, что энергия команды должна быть сопоставима с энергией объекта воздействия, хотя реально постоянно отвергает этот тезис.

Суть способа слабого акустического воздействия состоит в следующем: в непосредственно примыкающую к среде влияния короткозамкнутую гальваническую петлю-антенну (магнитный диполь) от маломощного генератора ($\sim 10\text{В} \cdot \text{А}$) подаются слабые электрические импульсы тока характерной для данного процесса формы, периодичности и скважности.

Импульсный электроток создает поперечное пульсирующее магнитное поле и формирует в скин-слое антенны нормальные волны акустических продольных колебаний тензоимпульсное давление с характерным или выбранной формы импульсов набором гармоник, т.е. происходит процесс электромагнитного акустического преобразования ЭМАП (рисунок 1.1).

Акустические волны беспрепятственно и с большой скоростью распространяются в среде влияния, оказывая воздействие на скорость протекания процессов. Частота следования электромагнитных импульсов, подаваемых в петлю - антенну, лежит в радиодиапазоне от единиц до тысяч килогерц и определяется экспериментально по максимальной эффективности.



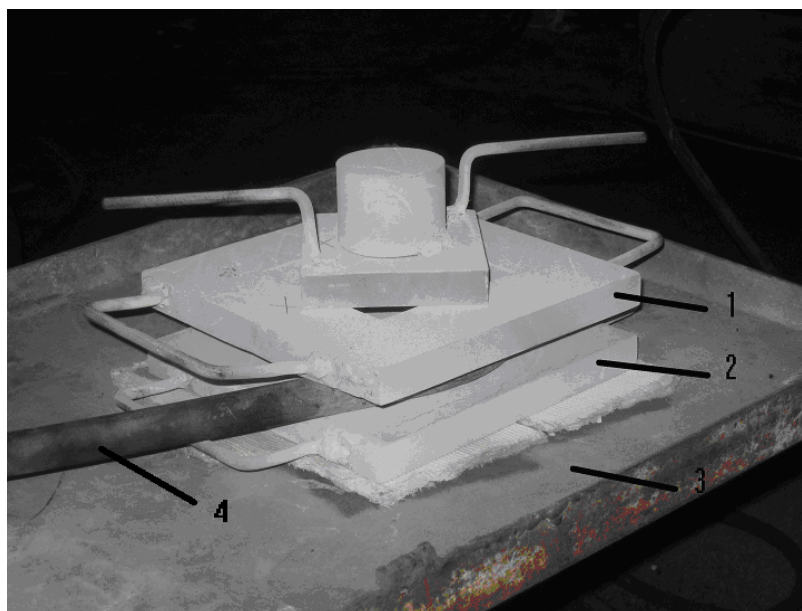
E - напряженность электрического поля, I – ток, H - напряженность магнитного поля, НВП(1) – нормальная акустическая волна в проводнике, созданная в скин-слое толщиной δS , НВД(1) – нормальная акустическая волна в диэлектрике, НВП(2)—акустическая волна в проводнике, созданная в диэлектрике, НВД(2) – акустическая волна в диэлектрике, возникающая под действием первичной напряженности H , E_{ind} – индуцированное электрическое поле

Рисунок 1.1 – Электромагнитно – акустическое преобразование (тензоимпульсное давление)

Оборудование, оснастка, материал, приборы

В качестве материала для литья использовался пищевой алюминий АД0, применяемый в производстве алюминиевой посуды.

Для оснастки использовались плитки из стали 45 и толщиной 20 мм. Из них изготовлен штамп, состоящий из 3^х основных деталей: 1 – подштамповая плита, 2 – матрица, 3 – пуансон (рисунок 1.2). Пуансон имеет размеры, соответствующие размерам в плане рабочей полости матрицы, которая по высоте составляет $20 \cdot 10^{-3}$ м.



1 – подштамповая плита; 2 – матрица; 3 – пуансон; 4 – горелка

Рисунок 1.2 – Штамповая оснастка

Для покрытия поверхностей штампа используется тальк и графит. Для получения макро и микрошлифов применяется эпоксидная смола, отвердитель и шлифовальная установка.

Для жидкостной формовки применялся гидравлический пресс усилием 100 кН. С величиной хода $500 \cdot 10^{-3}$ м. Устройство пресса позволяет передавать усилие в любом положении ползуна. Ввиду небольшого объема и веса слитки детали (165 грамм) исходную заготовку расправляют в ковше емкостью около 3 литров, выполненном из нержавеющей металла. Нагрев

до плавления осуществлялся газовой кислородной горелкой недалеко от прессы.

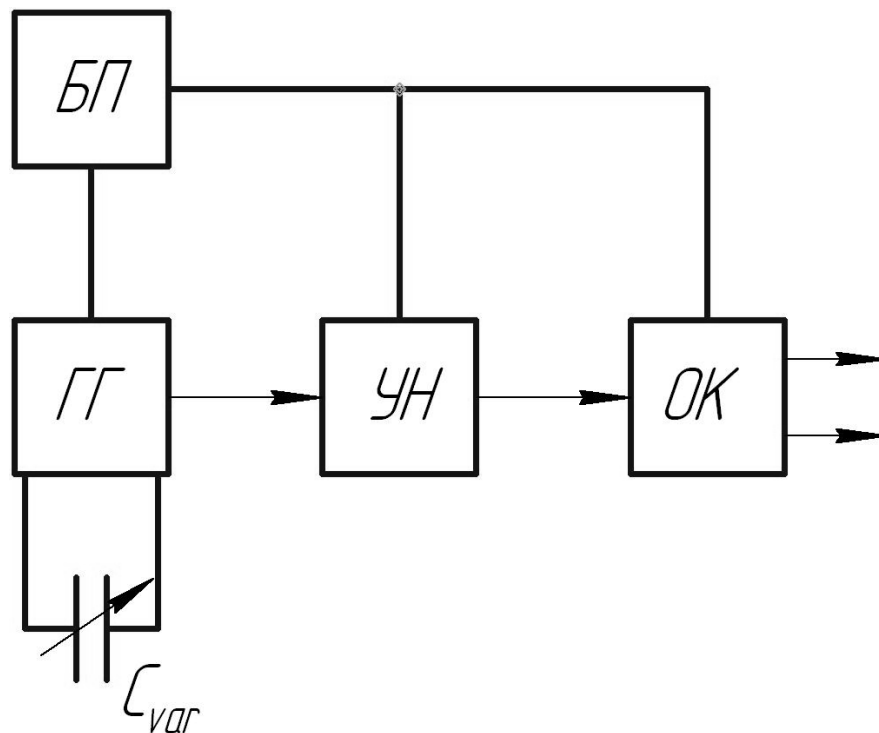


1 – гидравлический пресс; 2 – штамповая оснастка

Рисунок 1.3 – Гидравлический пресс с оснасткой

В качестве источника слабых электромагнитных импульсов используется одноканальный формирователь со следующими характеристиками (рисунок 1.4):

- Выходная частота сигнала – от 50 кГц до 200 кГц;
- Выходное напряжение- не более 10 В эфф;
- Выходная мощность – 10 Вт;
- Длина кабеля, соединяющего формирователь с нагрузкой не более 10м.
При использовании радиочастотного кабеля его волновое сопротивление должно быть не менее 50 Ом;
- Напряжение питания – 220 В, 50 Гц;
- Потребляемая мощность – не более 30 Вт.



БП - блок питания; ГГ - генератор сигнала; УН - усилитель двухканальный; ОК - оконченный каскад

Рисунок 1.4 – Блок-схема одноканального формирователя

Генератор питается от собственного источника выполненного на диодном мосте (VD1...VD4), фильтрующих емкостях (C1...C4) и стабилизатора напряжений ДА2. Питание промежуточного каскада на транзисторах VT1, VT2 и оконечного каскада осуществляется от нестабилизированного источника - диоды VD5...VD8, конденсаторы C5...C7. На рисунках 1.5, 1.6 представлен генератор акустических воздействий и схема реализации метода.

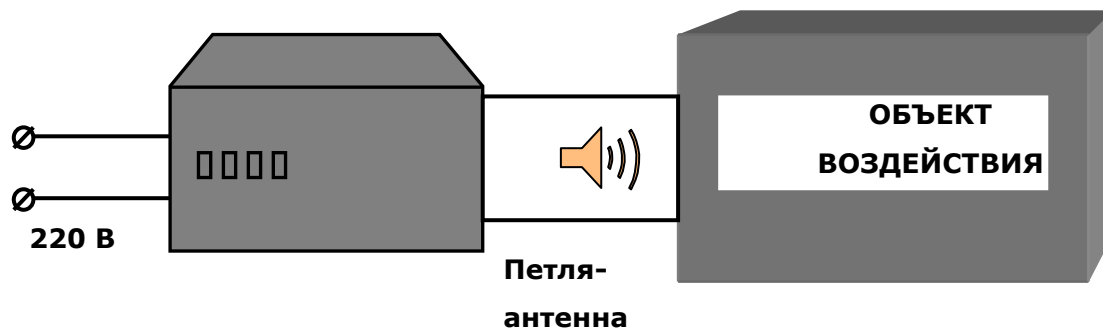


Рисунок 1.5 – Схема реализации метода акустического воздействия



Рисунок 1.6 – Генератор акустических колебаний

Замер температуры производят с помощью термопары.

Порядок выполнения работы

1. Устанавливают оснастку на гидравлический пресс вместе с пуансоном, смазав предварительно рабочие поверхности тальком и графитом.
2. Расплавляют алюминий в нержавеющей ковше до температуры 700-720⁰ С.
3. Газовой горелкой подогревают оснастку до температуры 200-250⁰ С.
4. В специальное отверстие в матрице вводят проволоку от петли формователя в зону заливки расплава.
5. Расплавленный алюминий заливают в оснастку, устанавливают пуансон и прикладывают к пуансону усилие из расчета 100 МПа.
6. Включают формователь с частотой на выходе 500 кГц вплоть до полной кристаллизации расплава.
7. Полученный слиток удаляют из оснастки.
8. Далее проводят работы в последовательности по позициям 1 – 7.
9. Из полученных слитков вырезают образцы (кубики) размером $10 \times 10 \times 10 \cdot 10^{-3}$ мм. Шлифуют, полируют на шлифовальной машине, проводят травление.
10. На металлографическом микроскопе (x400) определяют размеры зерен.
11. Делают выводы о влиянии тензоимпульсного давления на процесс кристаллизации.

2 Влияние тензоимпульсного давления от слабых токов на структуру алюминиевого сплава при литье по способу погружения

Цель работы: исследовать процесс по способу погружения с различным по частоте тензоимпульсным давлением.

Задачи:

1. Выявить механизм процесса по способу погружения.
2. Выявить механизм влияния тензоимпульсного давления на процесс кристаллизации при литье по способу погружения.
3. Установить величину оптимальной частоты импульсов тока на структуру сплава.

Механизм процесса по способу погружения

Эффективна с точки зрения получения мелкого зерна схема литья способом погружения (рисунок 2.1).

Такая компоновка даст возможность увеличить скорость охлаждения расплава, получить равную по сечению мелкозернистую структуру.

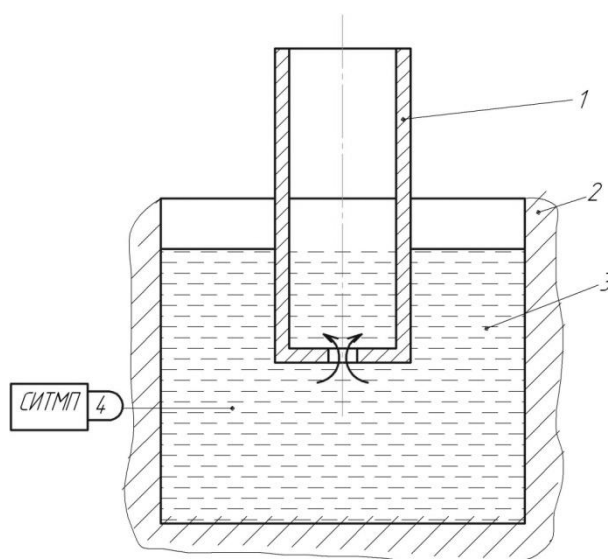
Способ «погружение» открывает совершенно новые возможности, поскольку нет большого различия в условиях получения простых и сложных профилей. Этот способ делает широкодоступным изделия из металлов сложного профиля типа продольноорезбрённые трубы и другие профильные изделия. Такие изделия в настоящее время изготавливаются давлением из больших слитков (прокаткой, прессованием и т.п.) с применением мощного сложного, дорогостоящего оборудования, больших энергетических затрат на деформирование металла.

Технология литья «погружением» позволяет получать высококачественные отливки с плотной мелкозернистой структурой.

Технологический процесс разработан в 90-е годы. Главными достоинствами отливок, получаемых по этой технологии, является высокая

плотность, герметичность и точность. Подобные свойства позволяют использовать их в узлах и агрегатах с повышенными требованиями к прочности и сроку службы.

Отличительная особенность технологии заключается в том, что заливка расплавленного металла в форму ведется в направлении снизу вверх (через питатели), а начинающееся после заливки одностороннее затвердевание направлено сверху вниз. При этом формирование отливки происходит направленно при большом градиенте температур. В ходе процесса осуществляется постоянная подпитка фронта кристаллизации перегретым металлом. Это приводит к получению мелкого зерна и отсутствию усадочной пористости в отливках. Получаемые отливки имеют высокую плотность, достичь которую не позволяет ни литье под давлением, ни другие способы литья.

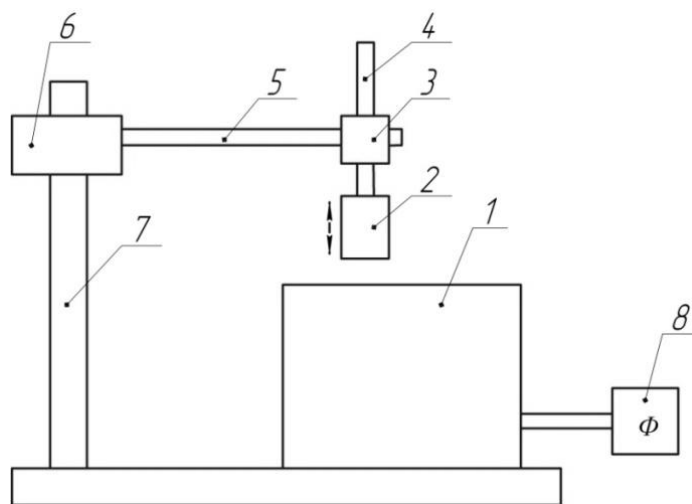


1 – оснастка, 2 – кокиль, 3 – расплав,
4 – формирователь слабых импульсов тока

Рисунок 2.1 – Схема литья способом погружения

Для подвода расплавленного металла в полость литней формы (кокиля) не требуется специальной литниково-питающей системы (ЛПС),

достаточно простых питателей небольшого сечения. За счет отсутствия ЛПС достигается экономия 30-40% жидкого металла, идущего на изготовление отливки. Схема технологической установки представлена на рисунке 2.2.



1 – печь сопротивления, 2- водоохлаждаемый кокиль,
3 – механизм подъема-опускания кокиля, 4 – шток, 5 – консоль,
6 – механизм поворота консоли с кокилем, 7 – стойка, 8 – формиратель

Рисунок 2.2 – Схема установки литья погружением

Оборудование, оснастка, материалы

Материал для литья – пищевой алюминий АД0. Литейная установка (рисунок 2.2 – 2.3) состоит из печи 1, подъемного механизма 2, пульта управления 3, силового щипа 9.



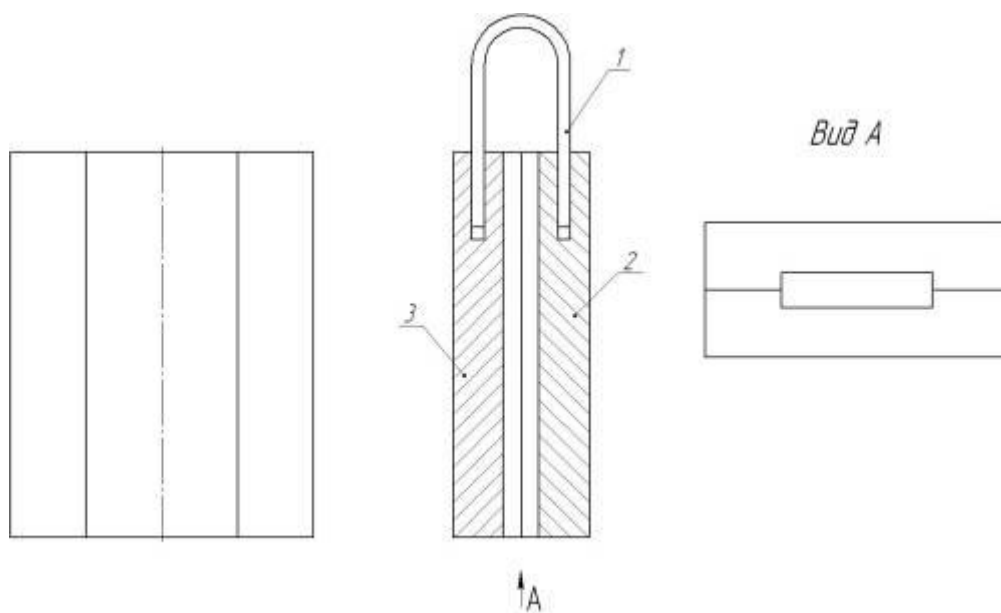
1 – печь сопротивления; 2 – механизм подъема оснастки; 3 – пульт управления; 4 – шток; 5 – консоль; 6 – механизм поворота консоли с оснасткой; 7 – стойка; 8 – электрощит

Рисунок 2.3 – Установка литья погружением

Печь емкостью до 10 литров позволяет расплавить алюминий в виде кусочков и поддерживать заданную температуру $700-750^{\circ}\text{C}$. С помощью механизма подъема опускается нагретая до $200-250^{\circ}\text{C}$ оснастка в расплав до $2/3$ ее высоты. Затем после выдержки $0,5 - 1$ мин оснастку поднимают, отщепляют от механизма подъема и разбирают, чтобы высвободить отливку в виде плоского слитка. В момент кристаллизации, соответствующей выдержки, проводится воздействие на расплав слабыми импульсами тока (рисунок 1.5).

В качестве кокиля используется оснастка, представленная на рисунке 2.4

В результате получают образцы отливки толщиной $6 \cdot 10^{-3}$ м, шириной $50 \cdot 10^{-3}$ м и длиной $90 \div 120 \cdot 10^{-3}$ м (рисунок 2.5).



1 – замок, 2 – правая половина кокиля, 3 – левая половина кокиля

Рисунок 2.4 – Схема конструктивного исполнения кокиля



Рисунок 2.5 – Образцы отливок, полученных по способу «намораживания»

Порядок выполнения работы

1. В печь установки закладывают куски алюминия АД0, не менее 10 кг.
2. Расплавляют алюминий при температуре 700-750⁰ С.
3. В расплавленный алюминий вводят петлю от источника слабых импульсов тока.
4. С помощью горелки подогревают оснастку до 200⁰ С, предварительно закрепив ее на механизме поворота и опускают ее в расплав на 1 – 2 мин.
5. Затем поднимают оснастку и извлекают полученный слиток.
6. Далее проводят работы по позициям 1 – 5 без воздействия на расплав слабых импульсов тока.
7. Из полученных слитков вырезают образцы (кубики) размером $10 \times 10 \times 10 \cdot 10^{-3}$ мм. Шлифуют, полируют на шлифовальной машине, проводят травление.
8. На металлографическом микроскопе (x400) определяют размеры зерен.
9. Делают выводы о влиянии тензоимпульсного давления на процесс кристаллизации.

Реферат

Изобретение относится к области металлургии, в частности к деформируемым наноструктурным сплавам на основе алюминия, меди, марганца и способа их получения для изделий, работающих при повышенных температурах.

Сплав на основе алюминия содержит компоненты при следующем их соотношении, масс. %: медь 0,5-2,0; марганец 0,5-1,6; бор 0,02-0,15; цирконий 0,1-0,5; скандий 0,02-0,15; железо 0,01-0,3; кремний 0,01-0,15, неизбежные примеси 0-0,1, из них каждого 0-0,03, алюминий – остальное.

При этом бор присутствует в структуре в виде наночастиц AlB_2 , AlB_{12} , боридов (в том числе с неизбежными примесями) для обеспечения электропроводности выше 54% IACS, предела прочности (σ_g) после 400 часов нагрева при 250⁰С не менее 160 МПа. Для повышения предела прочности после выдержки 400 час. при нагреве при 250⁰С до 230-280 МПа сплав отличается следующим соотношением компонентов, масс. %: медь 0,9-2,0; марганец 1,0-1,6; бор 0,02-0,15; цирконий 0,1-0,5; скандий 0,02-0,15; железо 0,01-0,3; кремний 0,01-0,15, неизбежные примеси 0-0,1, из них каждого 0-0,03, алюминий – остальное. Причем бор образует устойчивые сегрегации в приграничных областях на дефектах кристаллической решетки, повышая способность сплава к деформации и изменяя кинетику старения. Для более стабильного увеличения теплопрочности сплав может дополнительно содержать, масс. %: кобальт 0,1-0,45 и/или никель 0,1-0,35, и/или кадмий 0,1-0,2.

Способ получения деформированного полуфабриката включает приготовление расплава при температуре, превышающей линию ликвидуса на 100⁰С. компоненты вводятся в расплав в виде лигатур с мелкокристаллической структурой, бор – в виде специального состава, содержащего фторборат калия, гексохлорэтан и фтористый калий. При использовании лигатуры Al-B-Ti, содержание титана в расплаве не должно превышать 0,05 мас. %. Расплав подвергается воздействию

магнитноимпульсного поля и/или слабоимпульсного тока для перемешивания и воздействия в дальнейшем на кристаллизацию и деформацию, размер наночастиц и теплопрочности.

Деформирование литой заготовки осуществляется при температуре, превышающей 400°C и/или комнатной температуре.

Заявка на патент
Деформируемый теплопрочный электропроводный сплав на основе
алюминия

RU

МПК C21C21/12

C22F1/057

Авторы: Гречников Фёдор Васильевич (RU)
Попов Игорь Петрович (RU)
Гольдбухт Галина Ефимовна (RU)
Бибиков Алексей Михайлович (RU)
Журавель Леонид Васильевич (RU)
Живодёров Виктор Макарьевич (RU)

Изобретение относится к области металлургии, в частности к деформируемым наноструктурным сплавам на основе алюминия, меди, марганца и способу их получения для изделий, работающих при повышенных температурах. В частности сплав может быть использован в авиации, в космонавтике, автомобилестроении, для изделий электротехнического назначения, где требуются сочетания достаточной и различной прочности, электропроводности и термостойкости.

Известные сплавы системы Al-Cu-Mn с высоким содержанием меди («Машиностроение. Энциклопедия в 40 т. т. II-3. Цветные металлы и сплавы. М. Машиностроение, 2001, с. 144-156»). Это сплавы Д20, 1201, Д21, 01205 с 5,8-7,0 мас. % меди. Они обладают электропроводностью не выше 30-35% IACS, из-за использования после закалки и искусственного старения и высокого содержания меди.

Известен сплав по патенту РФ № 2287600 (публ. бюл. 32 20.11.2006), содержащий медь, марганец, цирконий и ванадий, включающий

алюминиевый твёрдый раствор и вторичные алюминиды, отличающийся тем, что он дополнительно содержит скандий при следующем соотношении компонентов, масс. %: медь 1,2-2,4; марганец 1,2-2,2; цирконий 0,5-0,6; ванадий 0,01-0,15; скандий 0,01-0,2; алюминий – остальное. После 100 часов выдержки сплав имеет предел прочности при 350 °С выше 30 МПа. При высоком пределе прочности после 1-20 мин. отжига при 200-410 °С, равным 300 МПа сплав обладает низкой электропроводностью – ниже 48% IACS.

Наиболее близким к заявленному объекту является сплав на основе алюминия, раскрытый в патенте 2446222 (публ. 27.03.2012, бюл. №...), содержащий компоненты при следующем соотношении, масс. %: медь 0,9-1,9; марганец 1,0-1,8; цирконий 0,2-0,64; скандий 0,01-0,12; железо 0,15-0,5; кремний 0,05-0,15; алюминий – остальное, наночастицы фазы $Al_3(Zr, Sc)$ со средним размером не более 20 нм, электропроводность превышает 53 % IACS, временное сопротивление (σ_s) после 100 час при 300 °С превышает 320 МПа.

Недостатком данного сплава, несмотря на многие преимущества, является недостаточная прочность при выдержке 400 час (250 °С), а также электропроводность не выше 53% IACS.

В основу изобретения положена задача создать новый наноструктурный деформируемый сплав на основе алюминия, который обладает большей термостойкостью и электропроводностью по сравнению со сплавом-прототипом для разных полуфабрикатов и изделий. Поставленная задача решается созданием наноструктурного сплава на основе алюминия, содержащего медь, марганец, бор, цирконий, скандий, железо и кремний. Сплав представляет собой матрицу на основе твёрдого раствора алюминия с равномерно распределёнными в ней боридами, наночастицами AlB_2 и AlB_{12} , вторичными первичными алюминидами в том числе, переходных металлов при следующем соотношении компонентов, масс. %:

- медь 0,5-0,85
- марганец 0,5-0,95

- бор 0,02-0,15
- цирконий 0,1-0,5
- железо 0,01-0,30
- кремний 0,01-0,15
- неизбежные примеси, из них каждого 0,003
- алюминий – остальное.

Сплав обеспечивает для ряда изделий электропроводность выше 54% IACS и временное сопротивление (σ_s) после 400 часов нагрева при 250 °С не менее 160 МПа. Для повышения предела прочности (σ_s) до 230-280 МПа после выдержки 400 час при 250 °С для других изделий сплав имеет следующее соотношение компонентов, масс. %:

- медь 0,9-2,0
- марганец 1,0-1,6
- бор 0,02-0,15
- цирконий 0,1-0,5
- скандий 0,02-0,15
- железо 0,01-0,30
- кремний 0,01-0,15
- неизбежные примеси 0-0,1, из них каждого 0-0,003
- алюминий – остальное.

При этом бор образует устойчивые сегрегации в приграничных областях на дефектах кристаллической решётки, повышая способность сплава к деформации, изменяя кинетику старения. Для более стабильного увеличения теплопрочности сплав может дополнительно содержать, мас. %: Кобальт 0,1-0,45 или никель 0,1-0,35, и/или кадмий 0,1-0,3.

Приготовление расплава для производства деформированных полуфабрикатов (листы, шины, штамповка, проволока для бортовых проводов и других применений) производится при температуре, превышающей ликвидус на 100 °С. Компоненты вводятся в расплав в виде

лигатур с мелкокристаллической структурой, бор в виде специального состава, содержащего фторборат калия, гексохлорэтан и фтористый калий. При использовании лигатуры Al-B-Ti, полученное содержание титана в расплаве ограничивается 0,05 мас. % для обеспечения требуемой электропроводности. Дополнительно для перемешивания расплава, повышения его чистоты по содержанию газов и нежелательных примесей, мелкозернистости литого материала при кристаллизации и деформации производится воздействие магнитноимпульсного поля или слабоимпульсного тока.

Марганец, цирконий и кобальт замедляют распад твёрдого раствора при высоких температурах, замедляют процесс рекристаллизации. Марганец и медь в указанных концентрациях вызывают образование дисперсоидов, обеспечивающих основные требования по прочности. Их увеличение снижает электропроводность. Цирконий и скандий способствуют образованию наночастиц и вносят свой вклад в достижение требуемой прочности при повышенных температур. Увеличение их содержания снижает электропроводность.

Железо и кремний также снижают электропроводность, но в виде совместных соединений с марганцем эвтектического типа Al(Fe, Mn) Si способствуют образованию структуры, повышающей прочность сплава.

Бор в виде наночастиц с алюминием и в виде боридов с переходными металлами, повышает электропроводность, сплава. Одновременно образуя устойчивые сегрегации в приграничных областях на дефектах кристаллической решётки, бор повышает способность к деформации и в определённой степени ускоряет кинетику старения.

Примеры выполнения заявленного материала

Сплавы были приготовлены в электрической печи сопротивления в алундовых тиглях при температуре расплава на 100 °C выше линии ликвидуса. В качестве шихты использовали алюминий (99,9%), медь (99,9%),

мелкозернистые двойные лигатуры: Al-Mn, Al-Zr, Al-Sc, Al-Si, Al-Fe, тройную лигатуру Al-B-Ti или состав для введения бора (фторборат калия, гексохлорэтан, фтористый калий). Составы сплавов даны в таблице 1. Круглые слитки отливали в цилиндрическую изложницу. Магнитноимпульсные поля (МИП) или слабые импульсные токи (СИТ) применяли для перемешивания расплава, повышения его чистоты (газы, примеси), воздействия на кристаллизацию и деформирование.

Максимальная температура деформирования не превышала 400 °С, для составов с 0,5-0,85 Cu и 0,5-0,95 Mn мас. % деформация осуществлялась при комнатной температуре. Отжиг проводили при температуре 350 °С.

Твёрдость по Виккерсу измеряли по ГОСТ 2999-75 с переводом на H_v и σ_v . Удельное электросопротивление и электропроводность определяли по ГОСТ 6132.

Как видно из анализа таблиц 1 и 2, составы №1 и №2 отличаются более высокой электропроводностью, а составы более высоким пределом прочности после выдержки 400 час. при 250 °С по сравнению с прототипом (пат. №2446222).

Таблица 1 – Химический состав экспериментальных сплавов

№ п/п плавки	Cu	Mn	Zn	Fe	Si	Sc	B	Примеси
1	0,8	0,6	0,12	0,1	0,1	0,12	0,05	0,08
2	0,8	0,6	0,12	0,1	0,1	0,12	0,06	0,08
3	1,5	1,4	0,5	0,3	0,1	0,06	0,15	0,1
4	1,8	1,4	0,5	0,3	0,1	0,06	0,08	0,1

Таблица 2 – Механические свойства и электропроводность образцов после отжига при 250 °С, 400 час

№ плавки	σ_s , МПа	IACS, %
1	170	57
2	190	56
3	260	55
4	280	54
Прототип (таблица 2 №3)	240	53

Формула изобретения

1. Сплав на основе алюминия, содержащий медь, марганец, цирконий, скандий, железо и кремний, алюминиевый твёрдый раствор и вторичные алюминиды марганца, циркония и скандия, отличающийся тем, что он дополнительно содержит бор при следующем соотношении компонентов, масс. %:

- медь 0,5-0,85
- марганец 0,5-0,95
- бор 0,02-0,15
- цирконий 0,1-0,5
- скандий 0,02-0,15
- железо 0,01-0,30
- кремний 0,01-0,15
- неизбежные примеси 0-0,1, из них каждого 0-0,003
- алюминий – остальное.

При этом бор присутствует в структуре в виде наночастиц AlB_2 , AlB_{12} , боридов (в том числе с неизбежными примесями) для обеспечения электропроводности выше 54% IACS, предела прочности после 400 часов при 250 °С не менее 160 МПа.

2. Сплав по п.1, отличающийся следующим соотношением компонентов, масс. %:

- медь 0,9-2,0
- марганец 1,0-1,6
- бор 0,02-0,15
- цирконий 0,1-0,5
- скандий 0,02-0,15
- железо 0,01-0,30
- кремний 0,01-0,15
- неизбежные примеси 0-0,1, из них каждого 0-0,003
- алюминий – остальное.

Для повышения предела прочности после 400 часов при 250 °С до 230-280 МПа.

3. Сплав по п.1 и п.2 дополнительно содержит, масс. %: кобальт 0,1-0,45 или никель 0,1-0,35.

4. Способ получения деформированного полуфабриката из сплава по п. 1, п. 2 и п. 3 включает приготовление расплава при температуре, превышающей температуру ликвидуса на 100 °С. Введение компонентов в расплав в виде лигатур с мелкокристаллической структурой. При использовании лигатуры Al-V-Ti содержание титана в расплаве не более 0,05 мас. %.

5. Расплав по п. 1, п. 2 и п. 3 кристаллизация литой заготовки и её деформация осуществляются при воздействии магнитноимпульсного поля или слабоимпульсного тока для обеспечения требуемого размера наночастиц и теплопрочности.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СПОСОБОВ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ АЛЮМИНИЕВО-МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Гречников Ф.В., Попов И.П., Демьяненко Е.Г., Бибиков А.М.,

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

RESEARCH OF POSSIBILITIES TO OBTAIN HIGH- ALLOY ALUMINUM- MAGNESIUM ALLOYS

Grechnikov F.V., Popov I.P., Bibikov A.M., Demyanenko E.G.

Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolyov (National Research
University)

Предложен сплав в сочетании с способом литья, позволяющий получить мелкозернистую плотную структуру литой заготовки с повышенными прочностными и пластическими свойствами, обеспечивающими требуемые технологические свойства, как при литье, так и при пластической деформации литой заготовки.

It is suggested the new alloy and casting method, which allows to obtain the compact and fine-grained structure of cast billet with increased mechanical and plastic properties, which provide the required technological properties as during casting, as during plastic forming of cast billet.

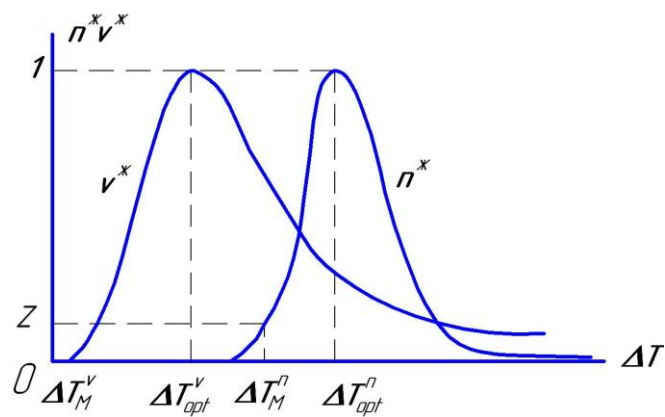
Сплав, способ, кристаллизация, микроструктура, зерно, литье, заготовка.

Keywords: Alloy, method, crystallization, microstructure, grain, casting, billet.

Известные в настоящее время высоколегированные алюминий-магниевого сплавы обладают недостаточно высокими механическими свойствами. Во время холодной деформации у них проявляется резко выраженный физический предел текучести в виде следов линий Людерса, которые ухудшают внешний вид изделия, а недостаточно высокие пластические свойства (низкая деформируемость на стадии изготовления листовых полуфабрикатов), не позволяют использовать алюминий-магниевого сплавы для операции штамповки, особенно для глубокой вытяжки. В связи с этим возникла необходимость рассматривать способы, позволяющие получать Al-Mg сплавы, обладающие высокими технологическими и эксплуатационными характеристиками. Технология изготовления известного алюминий-магниевого сплава (SU, А 3842895), включает постоянную подачу расплава в кристаллизатор, где от области, занятой жидким металлом, осуществляют непрерывный отвод тепла с воздействием однонаправленного постоянной величины магнитного поля, имеющего магнитную индукцию порядка 0,188 Тл. При этом происходит торможение

конвективного потока этого металла, за счёт чего уменьшается ширина жидко-твёрдой фазы, которая существует между изотермами ликвидус и солидус, и достигается снижение дендритной и зональной ликвации легирующих компонентов и примесей, присутствующих в этом сплаве. Однако, это характерно для сплавов с достаточно узким интервалом кристаллизации, а на сплавы с широким интервалом кристаллизации, в частности, содержащие сильноликвирующие компоненты, как магний, кремний, особенно при высокой их концентрации, указанное магнитное поле недостаточно эффективно воздействует на образующиеся в процессе кристаллизации первичные интерметаллиды, что снижает структурную и химическую однородность сплава и не обеспечивает равномерность структуры по сечению слитка. При воздействии постоянного магнитного поля ширина жидкотвёрдой фазы сплава с широким интервалом кристаллизации остаётся достаточно большой и не может в необходимой степени снизить микро- и макроликвацию. Дендритные ячейки твёрдого раствора алюминия и междендритные (межзёрные) включения недостаточно измельчаются, что снижает пластические свойства, технологические и эксплуатационные характеристики.

Получить литейно - деформируемый сплав на основе алюминия, как с широким, так и с узким интервалом кристаллизации (путем обработки металла в процессе приготовления расплава) с акустическим воздействием, возможно благодаря увеличению количества, например магния и кремния, при температурах близких к солидусу. При этом в процессе кристаллизации образуется дисперсная микроструктура сплава из зёрен твёрдого раствора алюминия, первичных и вторичных интерметаллических соединений, например, таких как Zn_2Al_3 , $TiAl_3$, Mg_2Al_3 , которые обеспечивают повышение технологичности сплава. Акустическое воздействие вызывает в процессе кристаллизации повышение вязкости расплава и изменение коэффициента теплопереноса за счёт изменения физических свойств расплава. Кроме того, указанное воздействие уменьшает в сплаве содержание окисных и неметаллических включений. Это происходит в результате выталкивания окисных и неметаллических включений в процессе кристаллизации изделия к поверхности расплава. При этом увеличивается скорость теплоотвода, зарождаются новые центры кристаллизации и наблюдается эффект измельчения структуры. К этому выводу приводит анализ зависимостей Таммана Г.Г. (рисунок 1). Видно, что переохлаждение расплава на величину ΔT_{opt}^n однозначно приведёт к получению литой заготовки с максимально измельчённой структурой за счёт роста количества зародышей при ограниченном объёме расплава – без дополнительных модификаторов.



n^* - скорость образования количества зёрен в единице объёма;

v^* - скорость роста зёрен

Рисунок 1 – Нормированные зависимости Таммана Г.Г.

Таким образом, имеется возможность по управлению размерам зерна литой заготовки, когда управляющим параметром является переохлаждение. В этом случае зависимость величины зерна литой заготовки (произведённой любым способом) от значения величины переохлаждения имеет вид, приведённый на рисунке 2.

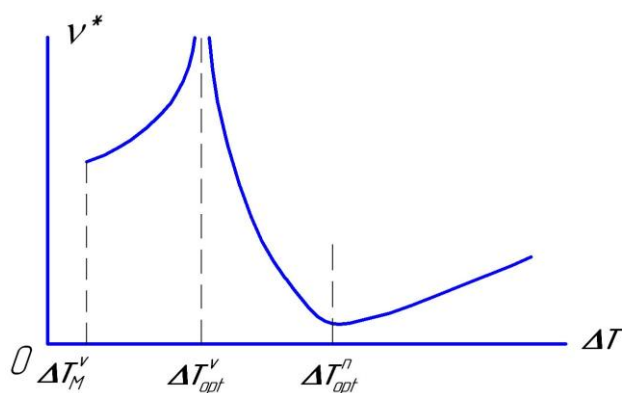


Рисунок 2 – Зависимость величины зерна литой заготовки от создаваемого переохлаждения

Получение равноосной мелкозернистой структуры позволяет существенно снизить или исключить последующий гомогенизирующий отжиг. Исключение гомогенизации позволяет сохранить пересыщенный магнием и кремнием твёрдый раствор α -алюминия, полученный при литье, уменьшить вторичную пористость в сплаве и снизить энергетические затраты при отжиге.

Эффект использования акустического воздействия заключается в дополнительном измельчении зёрен твёрдого раствора α -алюминия и растворении в нём тугоплавких легирующих составляющих сплава.

Поставленная задача решается созданием сплава, полученного на основе алюминия описанным выше способом и дополнительно содержащего кремний, магний, цирконий, бериллий, титан при следующем соотношении компонентов, масс. %:

- Кремний 4,0 – 20,0
- Магний 2,0 – 13,5
- Цирконий 0,05 – 0,2
- Бериллий 0,03 – 0,15
- Титан 0,02 – 0,1
- Алюминий остальное.

Введение магния в указанных пределах обеспечивает повышение предела прочности и предела текучести сплава, снижает его удельный вес с повышением удельной прочности и улучшением коррозионной стойкости. Магний в указанных пределах в технологии литья полуфабрикатов обеспечивает хорошие литейные свойства, что позволяет получать фасонные отливки, а также из литых заготовок полуфабрикаты способами обработки давлением. Магний с кремнием образует интерметаллическое соединение Mg_2Si с высокой микротвёрдостью, и повышает износостойкость. Цирконий в указанных пределах стабилизирует и упрочняет твёрдый раствор α -алюминия. Введение циркония ниже 0,05 масс. % недостаточно для стабилизации и упрочнения твёрдого раствора α -алюминия. Содержание циркония выше 0,2 масс. % ведёт к грубым выделениям игольчатой интерметаллидной фазы $ZrAl_3$, снижающей пластичность и эффективность данного компонента в сплаве. Бериллий введён в сплав для защиты магния от окисления в процессе приготовления сплава. В указанных пределах бериллий выполняет функцию защиты магния. При уменьшении его количества не будет обеспечена надлежащая защита от окисления, а увеличение его содержания выше указанного предела затруднит процесс непрерывного литья заготовок. Титан в указанных пределах введён как модификатор для улучшения технологичности сплава при деформации. Одновременно он является барьером для образования хрупкой интерметаллидной фазы Mg_2Al_3 . Введение титана ниже 0,02 масс. % недостаточно для модифицирования сплава, а введение его выше 0,1 масс. % приводит к выделению нежелательных алюминидов. Увеличение степени дисперсности выделяющихся частиц наблюдается при введении в сплав 0,005 – 0,04 масс. % Be, 0,005 – 0,02 масс. % Ti, 0,005 – 0,02 масс. % Zr. Эти добавки повышают концентрацию вакансий при закалке и интенсифицируют процессы диффузии магния и кремния при старении, облегчая образование зародышей метастабильной фазы β . Целесообразно, чтобы алюминиевый сплав дополнительно содержал 0,01 – 0,05 масс. % кобальта. Кобальт, являющийся элементом с меньшим атомным радиусом по сравнению с магнием и цирконием, уменьшает параметр

кристаллической решётки алюминия, повышает стабильность твёрдого раствора α -алюминия и технологичность сплава при прокатке. Совместно с цирконием кобальт благоприятно влияет на прочностные и пластические свойства предложенного сплава. Введение кобальта ниже 0,01 масс.% недостаточно для достижения указанного положительного эффекта, а введение его выше 0,05 масс.% ведёт к выделению алюминидов кобальта и снижению его положительного влияния. Так как растворимость кобальта при комнатной температуре соответствует 0,02 масс.%, а наибольшее его влияние будет тогда, когда он находится в твёрдом растворе α -алюминия в виде атомов, равномерно внедрённых в кристаллическую решётку алюминия. Благоприятное влияние на алюминиевый сплав оказывает бор при содержании 0,004 – 0,02 масс.%. Бор в указанных пределах введён в сплав для усиления модифицирующего воздействия титана на зёрна α -алюминия. Предпочтительно вводить бор в соотношении к титану как 1 : 5. В этом случае их совместное влияние наиболее эффективно. Поэтому нижний предел ограничен 0,004 масс.%, а верхний – 0,02 масс.%. Дальнейшее его повышение может вызвать выделение при кристаллизации сплава большого количества алюминидов бора и ухудшение технологических свойств, особенно при деформации. Желательно, чтобы алюминиевый сплав дополнительно содержал 0,01 – 0,3 масс.% хрома. Хром введён в состав сплава как элемент – антирекристаллизатор, который совместно с цирконием повышает устойчивость твёрдого раствора α -алюминия и улучшает прочностные свойства сплава. Уменьшение содержания хрома менее 0,01 масс.% не обеспечивает повышение температуры рекристаллизации сплава, что снижает его прочностные свойства. Увеличение содержания хрома выше 0,3 масс.% ведёт к образованию в структуре сплава тугоплавких интерметаллидов Cr_2Al_3 , которые ухудшают его технологичность.

Таким образом, предложенный сплав в сочетании с выбранным способом литья позволяет получить мелкозернистую плотную структуру литой заготовки с повышенными прочностными и пластическими свойствами, обеспечивающими требуемые технологические свойства, как при литье, так и при пластической деформации литой заготовки. Изготовление промежуточных изделий из предложенного сплава с высокими концентрациями магния и кремния с применением разработанной технологии позволяет исключить из технологической схемы весьма неблагоприятные высокотемпературные нагревы перед деформацией, значительно уменьшая внутридендритную и междендритную ликвацию, измельчая дендритные ячейки зёрен твёрдого раствора α -алюминия, увеличивая число эвтектических колоний, измельчить и уменьшить количество интерметаллических включений, повысить плотность и чистоту металла. При этом промежуточные изделия имеют предел прочности на растяжение выше 370 Мпа с одновременной деформируемостью в холодном состоянии по

Эриксону более 8,5 мм и плотную однородную кристаллическую структуру с равномерно распределёнными в матрице частицами дисперсностью от 5000 до 20000А. Для промышленного использования предлагается алюминиевый сплав, содержащий следующие компоненты, масс. %:

- Магний – 2,0 – 13,5%
- Кремний – 4,0 – 20,0
- Цирконий – 0,05 – 0,2
- Бериллий – 0,03 – 0,15
- Титан – 0,02 – 0,1
- Алюминий – остальное.

При этом сплав может содержать:

- Кобальт – 0,01 – 0,05
- Хром - 0,01 – 0,3
- Бор - 0,004 – 0,02

взятые порознь или в сочетании.

Сплав предварительно разогревают до температуры 720°С при акустическом воздействии на расплав частотой 500 КГц. Затем его дегазируют, подвергают фильтрации, переливают в раздаточную печь установки непрерывного литья и вытягивают заготовку из формирующего устройства, где осуществляют непрерывный отвод тепла, например подачей охлаждённого воздуха. В процессе кристаллизации сплав подвергают постоянному акустическому воздействию, например с частотой 1000 КГц. Указанную акустическую обработку проводят с применением формирователя одноканального Ф-1К, который генерирует акустические волны радиочастотного диапазона. Использование такого типа воздействия способствует лучшему усвоению в жидком алюминии плохо растворимых легирующих компонентов, например, кремния, при кристаллизации измельчает дендритные ячейки твёрдого раствора α -алюминия и первичные кристаллы кремния, повышает их однородность. Для достижения наилучшего эффекта целесообразно акустическое воздействие производить с области вершины изотермы ликвидус и до окончания кристаллизации. Экспериментально определено, что наилучший эффект от акустического воздействия обеспечивается от 200 до 1000 КГц, позволяя создать в переходной зоне (жидко-твёрдой фазе) синхронные колебательно-вращательные движения надмолекулярных структур сплава в протяжённые цепочки – бесконечные кластеры перколяции и изменять механизм теплопередачи, что приводит к упорядочению структуры и изменению твёрдости. При этом происходит кажущееся изменение диаграммы состояния (псевдодиаграмма) и повышается растворимость кремния и магния в алюминии. Кремний и магний равномерно

растворяются в алюминии, а легирующие добавки и образующиеся дисперсные интерметаллические соединения будут делать атомы кремния и магния менее подвижными, закреплять их в матрице твёрдого раствора α -алюминия. Если требуется, для деформирования литых заготовок проводят их гомогенизацию (при 420°C в печи, в течение 4 часов). Полученные литые заготовки и листы подвергают закалке при 380 – 435°C с последующим охлаждением. Например, в воде при 20 – 100°C или в масле при 20°C, или на воздухе. Таким образом, предлагаемый способ литья, основанный на воздействии акустических волн, имеет научно-обоснованные предпосылки для получения уникального по своим характеристикам сплава, обладающего как высокими литейными, так и деформируемыми свойствами.

Grechnikov Fedor Vasilievich, Corresponding member of RAS, Doctor of Engineering, Professor, Head of Metal Forming Department, Samara State Aerospace University; e-mail: gretch@ssau.ru. Area of research: anisotropic materials deforming.

Popov Igor Petrovich, Doctor of Engineering, Professor of Metal Forming Department Samara State Aerospace University; e-mail: igr_popov@mail.ru. Area of research: forming of complex shape parts from sheets, produced with influence of weak pulse currents.

Bibikov Aleksey Michailovich, Engineer of Metal Forming Department Samara State Aerospace University. Area of research: processes of casting and crystallization with influence of weak pulse currents.

Demyanenko Elena Gennadievna, Ph.D., Docent of Metal Forming Department Samara State Aerospace University; e-mail: e-dem@mail.ru. Area of research: forming of thin-walled complex shape parts.