Конспект лекций по дисциплине ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЛИТЕЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Кокильное литье

Сущность процесса, область применения, основные операции

Сущность литья в кокиль состоит в применении металлических материалов для изготовления многократно используемых литейных форм, металлические части которых составляют их основу и формируют конфигурацию и свойства отливок. Металлические формы заполняются расплавом под действием гравитационных сил.

Применение кокилей для получения отливок из черных и цветных сплавов известно давно, но широкое внедрение их в литейное производство сдерживается из-за низкой стойкости кокиля. Для чугунных отливок стойкость кокиля не превышает 500-600 съемов, для стальных отливок 200-300 съемов, для бронзовых отливок она достигает 2000-4000, а для алюминиевых 6000-8000 съемов.

При получении отливок в кокиль необходимо рассматривать особенности формирования и качество отливок, которое заключается в следующем.

* Высокая интенсивность теплового взаимодействия между отливкой и формой: расплав и затвердевающая отливка охлаждается в кокиле быстрее, чем в песчаной форме. Это осложняет получение в кокиле отливок из сплавов с пониженной жидкотекучестью и ограничивает минимальную толщину стенок и размеры отливок. Вместе с тем повышенная скорость охлаждения способствует получению плотных отливок с мелкозернистой структурой, что повышает вязкость и плотность металла отливок. Однако в отливках из чугуна могут образовываться карбиды, снижающие ударную вязкость, обрабатываемость и требующих термообработку.
* Кокиль практически не податлив и более интенсивно препятствует усадке отливки, что затрудняет извлечение ее из формы и может вызвать появление внутренних напряжений, коробление и трещин в отливках.

Однако размеры рабочей полости кокиля могут быть выполнены значительно точнее, чем песчаные формы. При литье в кокиль отсутствуют погрешности, вызываемые расталкиванием модели, упругими и остаточными деформациями песчаной формы, снижающими точность ее рабочей полости и соответственно отливки. Поэтому отливки в кокиле получаются более точными, что обеспечивает возможность уменьшения припусков на механическую обработку.

* Физико-химическое взаимодействие металла отливки и кокиля минимально, что способствует повышению качества поверхности отливки. Отливка в кокиле не имеет пригара. Шероховатость поверхности отливки определяется составами облицовок и красок, наносимых на поверхность рабочей полости формы, и соответствует R1= 80-100 км, но может быть и ниже.
* Кокиль практически негазопроницаем, но и газотворность его минимальна и определяется в основном составом огнеупорных покрытий, наносимых на поверхность рабочей полости. Однако, газовые раковины в кокильных отливках – явление не редкое. Причины их появления различны, но в любом случае расположение отливки в форме, способ подвода расплава и вентиляционная система должны обеспечивать удаление воздуха и газов из кокиля при заливке.

Эффективность производства отливок в кокиль, как, в прочем, и других способов литья, зависит от того, насколько правильно и точно используются преимущества этого процесса, учитываются его особенности и недостатки в условиях конкретного производства.

Основные преимущества литья в кокиль:

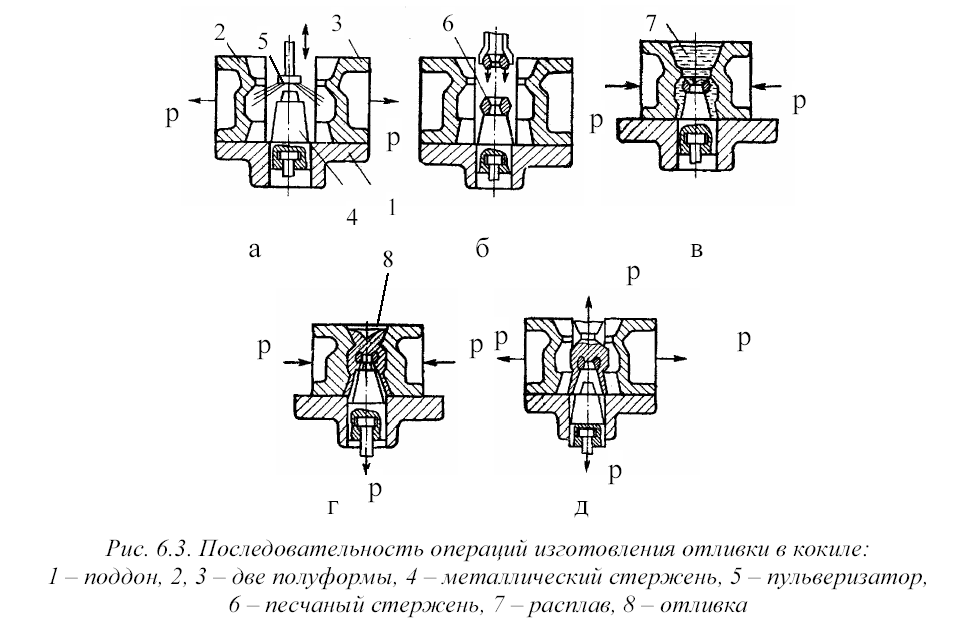
1. Повышение производительности труда в результате исключения трудоемких операций смесеприготовления, формовки, очистки отливок от пригара. Поэтому литье в кокиль позволяет в 2-3 раза повысить производительность труда, снизить капитальные затраты, увеличить съем отливок с 1 м2 площади цеха.
2. Повышение качества отливок, обусловленное использованием металлической формы, повышение стабильности показателей качества: механических свойств, структуры, точности и размеров отливки.
3. Устранение или уменьшение объема вредных для здоровья рабочих операций выбивки форм, очистки отливки от пригара, их обрубки, обще оздоровление и улучшение условий труда, меньшее загрязнение окружающей среды.
4. Механизация и автоматизация процесса изготовления отливок, обусловленная многократностью использования кокиля. При литье в кокиль устраняется сложность для автоматизации процесса изготовления литейной формы. Остаются лишь сборочные операции: установка стержней, соединение частей кокиля и их крепления перед заливкой, которые легко автоматизируется.

Литье в кокиль имеет и недостатки:

1. Высокая стоимость кокиля, сложность и трудоемкость его изготовления.
2. Ограниченная стойкость кокиля, измеряемая числом годных отливок, которые можно получить в данном кокиле. От стойкости кокиля зависит экономическая эффективность процесса, особенно при литье чугуна и стали, и поэтому повышение стойкости кокиля является одной из важнейших проблем технологии кокильного литья этих сплавов.
3. Сложность получения отливок с поднутрениями, для выполнения которых необходимо усложнить конструкцию кокиля – делать дополнительные разъемы, использовать вставки, разъемные металлические или песчаные стержни.
4. Отрицательное влияние высокой интенсивности охлаждения расплава в кокиле по сравнению с песчаной формой. Это ограничивает возможность получения тонкостенных протяженных отливок, а в чугунных отливках приводит к отбелу поверхностного слоя, ухудшающего обработку резанием, вызывает необходимость термической обработки отливок.
5. Неподатливый кокиль приводит к появлению в отливках напряжений, а иногда и трещин.

Основные технологические операции литья в кокиль

Перед заливкой расплава новый кокиль подготавливают к работе: поверхность рабочей полости и разъем тщательно очищают от слоев загрязнения, ржавчины, масла; проверяют легкость подвижных частей кокиля; точность их центрирования, надежность крепления, затем на поверхность рабочей полости и металлических частей (стержней) наносят слой огнеупорного покрытия (рис.1.1 а) – облицовки и краски

****

*р* ***–*** *направление разъема элементов кокиля*

Состав облицовок и красок зависит в основном от заливаемого материала, а его толщина – от требуемой скорости охлаждения отливки: чем толще слой огнеупорного покрытия, тем меньше скорость охлаждения отливки. Вместе с тем слой огнеупорного покрытия предохраняет рабочую поверхность формы от резкого повышения ее температуры при заливке, расплавление и схватывание с металлом отливки. Таким образом, облицовки и краски выполняют 2 функции: защищают поверхность кокиля от резкого нагрева и схватывания с отливкой и позволяют регулировать скорость охлаждения отливки, а значит, и процессы ее затвердевания, влияющие на свойства металла в отливке.

Перед нанесением огнеупорного покрытия кокиль нагревают газовыми горелками или электрическими нагревателями до температуры 150-1800С. Краски наносят на кокиль обычно в виде водной эмульсии через пульверизатор. Капли водной суспензии, попадая на поверхность нагретого кокиля, испаряются, а огнеупорная составляющая равным слоем покрывает поверхность.

После нанесения огнеупорного покрытия кокиль нагревают до рабочей температуры, которая зависит в основном от состава заливаемого сплава, толщина стенки отливки, ее размеров, требуемых свойств. Обычно температура нагрева кокиля перед заливкой 200-350 0С. Затем в кокили устанавливают песчаные или керамические стержни (Рис.1 б), если таковые необходимы для получения отливки, половинки кокиля соединяются (Рис.1 в) и скрепляются специальными зажимами, а при установке кокиля на кокильной машине с помощью ее механизма запирания, после чего в кокиль заливают расплав. Часто в процессе затвердевания и охлаждения отливки, после того, как отливка приобретет необходимую прочность, металлические стержни «подрывают», т. е. не полностью извлекают из формы (отливки) (Рис.1 г) до ее извлечения из формы. Это делается для того, чтобы уменьшить обжатие усаживающейся отливки металлического стержня и извлечения его из отливки. После охлаждения отливки до заданной температуры, кокиль раскрывается, окончательно извлекается металлический стержень, и удаляют металлическую отливку из кокиля (Рис.2 д). Из отливки выбивают стержень, обрезают литники, прибыли, выпоры, контролируют качество отливки. Затем цикл повторяется.

Перед повторением цикла осматривают рабочую полость кокиля, полость разъема. Обычно огнеупорную краску наносят на рабочую поверхность кокиля 1-2 раза в смену, изредка восстанавливая ее в местах, где она отслоилась от рабочей поверхности. После этого, при необходимости, что чаще бывает при литье тонкостенных отливок или сплавов с низкой жидкотекучестью, кокиль подогревает до заданной температуры, так как за время извлечения отливки и окраски рабочей поверхности он охлаждается. Если же отливки достаточно массивны, то наоборот, кокиль может нагреваться ее теплотой до температуры большей, чем требуемая температура, и перед следующей заливкой его охлаждают.

Для этого в кокиле предусматривают систему охлаждения.

Как видно, процесс литья в кокиль – малооперационный. Манипуляторные операции достаточно просты и кратковременны, а лимитирующей по продолжительности операцией является охлаждение отливки до заданной температуры. Практически все операции могут быть выполнены механизмами машины или автоматической установкой, что является существенным преимуществом способа, и, конечно, самое главное – исключается трудоемкий и материалоемкий процесс изготовления форм, кокиль используется многократно.

Особенности кристаллизации и усадки сплавов при литье в кокиль.

**В металлические формы.**

Почти всегда требуемые качества отливок достигаются при условии, если литейная форма заполняется расплавом без недоливов, неспаев, газовых и неметаллических включений в отливках. А при затвердевании в отливках не образуются раковины, пористость, трещины, а ее структура и механические свойства отвечают заданным.

Из теории формирований отливок известно, что эти условия достижения качества во многом зависит от того, насколько заданный тех. процесс обеспечивает одно из общих положений, получения качественных отливок – направленное затвердевание и питание отливок и обеспечивается комплексом мероприятий:

* рациональное конструирование отливок;
* расположение отливок в форме;
* конструирование литниково-питательной системы;
* технологический режим литья;
* конструкция и материал формы назначается с учетом свойств сплавов и особенности взаимодействия формы и расплава.

При литье в кокиль, главное из этих особенностей является высокоинтенсивность охлаждения расплава и отливки, что затрудняет заполнение формы расплавом, ускоряет его охлаждения в форме. Интенсивность теплого взаимодействия кокиля и расплава можно регулировать в широких пределах за счет создания определенного термического сопротивления на границе контакта отливка – форма.

На поверхность полости кокиля наносится слой огнеупорного покрытия или краски. Благодаря  , по сравнению с металлическим кокилем, теплопроводностью краски (), между отливкой и кокилем возникает сопротивление перепада тепла, в соответствии с формулой: 1/β=ε/λкр

Можно регулировать скорости отвода тепла отливка – кокиль.

Скорость отвода тепла, т. е. (q) зависит от коэффициента теплопроводности () и разности температур Т0 и Тк:

q = β (То-Тк);

где: **β** – коэффициент теплопроводности огнеупорной краски;

**ε** – толщина слоя огнеупорного покрытия;

**То** – температура отливки;

**Тk** – температура кокиля.

Огнеупорные покрытия кокиля должны иметь заданную теплопроводность, хорошо наносится и удерживается на поверхности кокиля, противостоять резкому колебанию температур, не выделять газы способные растворятся в отливках и не способные образовывать раковины на поверхности отливки.

Огнеупорные покрытия должны содержать:

**Огнеупорные материалы:** пылевидный и молотый кварц, молотый шамот, окислы и карбиды металла, тальк, графит, асбест.

**Связующие:** жидкое стекло, раствор огнеупорной глины, ССБ.

**Активаторы:** (для улучшения схватываемости огнеупорного покрытия с поверхностью кокиля), бура, борная кислота, кремний, фтористый натрий, марганцовокислый калий.

**Стабилизаторы:** ПАВ.

Для получения отливок из СЧ, на поверхности кокиля наносится копоть или сажа (с помощью газовой горелки).

Типовые рецептуры огнеупорных материалов для различных сплавов.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Назначение краски** | **Компоненты** | **Масса, %** | **Коэффициент теплопроводности** |
| Для отливок из Al | Окись Zn,  асбест пудра прокалины,  жидкое стекло,  вода | 15  5  3  77 | 0.41 |
| асбест-пудра прокал.  мел молотый,  жид. стекло,  вода | 8,7  17,5  3,5  70,3 | 0.27 |
| Для отливок из Mg сплавов | Тальк  борная кислота  жидкое стекло  вода | 18  2,5  2,5  77 | 0.39 |
| Для отливок из чугуна | пылевидн. кварц  жидкое стекло  вода | 10 – 15  3 – 5  80 – 87 | 0.58 |
| шамот молотый  жидкое стекло  вода  марг-кисл калий (р-р 0,05) | 40  6  54  > 100 | 0.25 |
| Для отливок из стали | Циркон  карборунд, окись Cr  жидкое стекло  борная кислота  вода | 30 – 40  5 – 10  0,7 – 0,8  до плотности 1,25 г/см3 | 0.3 |

Скорость отвода тепла зависит также от разности температур между отливками и поверхностью кокиля. Поэтому, скорость отвода тепла можно регулировать за счет изменения температуры заливаемого расплава и температуры поверхности кокиля перед заливкой.

Температура нагрева кокиля перед заливкой

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Сплав** | **Отливка** | **Толщина стенки отливки (мм)** | **Температура нагрева кокиля перед заливкой, 0С** |
| Al | Тонкостен. ребрист.  Ребрист. корпусн.  Прост. без ребер | 1,6 – 2,1  5 – 10  до 8 мм  > 8 мм | 400-420  350-400  250-350  200-250 |
| Mg | Тонкостен. сложн.  Толстостен | —————— | 350-400  250-350 |
| Cu | Средней сложности | 5-10 | 120-200 |
| СЧ | Различной сложности | до 5  5-10  10-20  > 20 | 400-450  300-400  250-300  150-250 |
| Ст | Для тонкостен.  Для толстостен. | —————— | 300  150 |

Оптимальная температура заливки расплава в кокиль

|  |  |
| --- | --- |
| Al (АЛ – 2, АЛ – 4)  Al – 9  Al – 19  Mg  Cu (медные) | 700-750  720-770  730-750  690-710 |
| Бронза – олово  Al – бр  Латуни  Свинцовые | 1150-1200  1100-1150  980-1050  1030-1100 |
| Чугун  толстостенные  тонкостенные | 1300-1330  1250-1280 |
| Стали углеродистые | 1450-1500 |

Номенклатура отливок. Механические свойства, точность и чистота поверхности при литье в кокиль.

Литье в кокиль следует применять для отливок из следующих сплавов:

**Al и Mg** – при любой конструкции отливок;

**Бронза и латунь** – отливки не сложной конфигурации с толщиной стенки > 5 мм.

**Чугун** – при несложной конфигурации отливки, с повышенным требованием плотности и герметичности.

**Сталь** – не сложной конфигурации отливки с толщиной стенок > 6 мм.

Высокая скорость охлаждения и затвердевания при литье в кокиль благоприятно влияет на качество отливки, повышая ее механические свойства, плотность, герметичность. Отливки в кокиль менее поражены газовой пористостью, т. к. высокая скорость охлаждения металла препятствует выделению газов из расплавов и уменьшается ликвация.

Литье в кокиль позволяет получить отливки с хорошей чистотой поверхности, малой шероховатостью, с минимальными допусками и припусками на механическую обработку. Так, допуски при литье в кокиль в 6-10 раз меньше, чем при литье в песчано-глинистые формы, класс чистоты поверхности отливки повышается на 3-4 кл. и припуски на мех. обработку снижаются на 3-5 раза.

Чугун в большей степени, чем другие сплавы, способен изменять структуру в зависимости от скорости охлаждения и затвердевания отливки, поэтому, управляя скоростью охлаждения таких отливок можно получить различную структуру от которой зависит механические свойства отливки, повышается герметичность, изменяется обрабатываемость, изменяется количество и размер графитовых включений.

Технология литья в облицовочный кокиль.

Сущность данного процесса заключается в нанесении достаточно толстого слоя облицовочного материала (4-6 мм) на рабочую поверхность кокиля, что позволяет резко повысить термическое сопротивление перепадов количества теплоты от отливки к стенкам кокиля, снизить скорость охлаждения отливки и температуру рабочей поверхности кокиля.

Использование этого процесса позволяет гарантированно устранять отбел в чугунных отливках, а так же повысить стойкость кокиля.

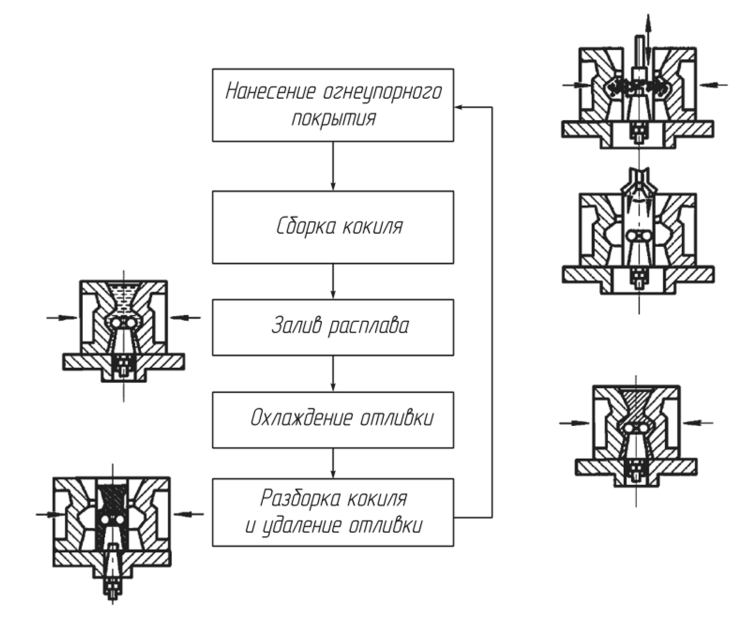


Рис. 3. Последовательность нанесения облицовки на рабочую поверхность кокиля.

1. Модельная плита с моделью;
2. Зазор между модельной плитой и стенкой кокиля;
3. Кокиль.

Кокиль и модельная плита предварительно нагревается до температуры 200-250 0С, для лучшего схватывания облицовки с поверхностью кокиля, его не обрабатывают.

Для лучшего отделения модели от облицовки, поверхность модели покрывают разделительным составом СКТ или СКТР. После нагрева, кокиль подают на позицию вдува облицовки на пескострельной машине.

Для облицовки используют плакированные песчаные смеси с пульвербакелитом 2,5-3% (ПК104), смесь хорошо обволакивает поверхность модели и кокиля, после затвердевания кокиль снимают с плиты (рис.3).

Аналогично изготавливается верхняя полуформа, только в ней предусматривается литниковая система. Затем кокиль собирают. Облицованный кокиль подают на заливку. После заливки, кокиль открывают и отливки удаляются из кокиля. Перед повторным использованием кокиля, остатки смеси удаляются сжатым воздухом.

Особенности формирования отливки в облицовочный кокиль

1. Большая по сравнению с обычными облицовками и красками толщина слоя облицовки позволяет существенно снизить скорость охлаждения отливки, особенно при производстве отливок из СЧ. Толщину слоя облицовки можно делать различным, изменяя зазор между моделью и стенкой кокиля, а значит, регулируя скорость охлаждения расплава и затвердевания отливки в широких пределах, изменить структуру и свойства отливки.
2. Деформация облицовки, имеющая жесткую металлическую опору (стенку кокиля), весьма мала. Это способствует повышению точности отливки, повышает жесткость формы, уменьшает усадочные поры и повышает пластичность отливки.
3. Песчаная облицовка придает форме податливость, поэтому в отливке резко уменьшается внутреннее напряжение, коробление, повышается точность отливки и исключает появление трещин. Вместе с этим, толстая облицовка позволяет снизить температуру взаимодействия на кокиль, благодаря чему исключает коробление, разгар кокиля и повышает его стойкость.

Недостатки:

1. Сложность и увеличение стоимости оснастки;
2. Трудности при наладке спец. оборудования;
3. Литье в облицовочный кокиль экономически целесообразен в крупносерийном и массовом производстве, отливки из чугуна и стали, массой до 200 кг (не более).

Литье по моделям удаляемым из неразъемных форм

Метод литья по моделям удаляемым из неразъемных форм благодаря ряду преимуществ по сравнению с другими способами изготовления деталей или же заготовок получили значительное распространение в машиностроении и приборостроении.

Впервые по этим методам изготовились отливки по выплавляемым моделям и этот метод известен с глубокой древности, и называется **методом восковой формовки.** Этим методом еще в 5-6 веке до н.э. и вначале н.э. отливаются в основном украшения.

В России по восковым моделям были изготовлены многие монументальные отливки («Медный всадник» Фальконэ, 1782 г; памятник Минину и Пожарскому 1816 г; скульптурные группы «» 1850 г и т.д.).

При изготовлении художественных отливок, ювелирных изделий, а так же зубных протезов методом литья по выплавляемым моделям применяется и в настоящее время.

Метод литья по удаляемым моделям в настоящее время широко применяется для изготовления сложных и точных отливок. К этим методам относятся: литье по выплавляемым моделям, литье по выжигаемым и растворяемым моделям.

Сущность этих методов заключается в том, что в специальных пресс-формах изготавливают модели отливок и литниковой системы. В качестве материала для изготовления моделей обычно используют легкоплавкие воскообразные составы, композиции на основе смол. Модели соединяются в блоки, после чего на них наносят суспензию из специального связующего раствора и пылевидного огнеупорного материала. Слои суспензии, для упрочнения их и лучшей взаимной связи, присыпают песком, а затем просушивают. Далее производят удаление моделей из огнеупорной оболочки выплавлением, растворением или выжиганием.

Метод литья по растворяемым и выжигаемым моделям

При этом методе модели изготовляют в пресс-формах из вспенивающегося полистирола (нагрев в горячей воде), автоклавом (нагрев пресс-формы паром под давлением в автоклавах) нагрев увлажненных гранул в пресс-формах токами высокой частоты (в ряде случаев с одновременным нагревом пресс-формы снаружи, горячим воздухом или паром) методом теплового удара (вдувание пара под давлением в заполненную гранулами пресс-форму) либо на литьевых машинах под давлением.

При освоении новых конструкций и изготовлении новых отливок в индивидуальном производстве модели получают методом механической обработки из пенополистироловых плит (иногда склеенных из нескольких). Это позволяет изготовить отливки в кратчайший срок и с минимальными затратами, т. к отпадает необходимость в трудоемкой работе по изготовлению пресс-формы или моделей.

Изготовление керамической оболочки для этих методов литья аналогичен, как и для литья по выплавляемым моделям и будет рассмотрен далее.

Удаление полуформы из огнеупорной оболочки осуществляется двумя способами:

1. Выжигание, может осуществляться при заливке расплава в форму. Этот метод имеет существенные недостатки; большое выделение продуктов сгорания полистирола, газонасыщенность расплава, приводящая к образованию газовых раковин и газовой пористости и науглероживания расплава при получении стальных отливок или выжигание модели путем введения раскаленного прутка или в печи пи прокаливании керамической формы.
2. Растворение модели органическим растворителем ацетоном, дихлорэтаном и др.

Литье по выплавляемым моделям.

Сущность литья по выплавляемым моделям заключается в использовании точной неразъемной разовой модели, по которой из жидких формовочных смесей изготовляется неразъемная керамическая оболочковая форма; перед заливкой расплава модель удаляется из формы выплавлением.

**Основные операции:** Модель или звено моделей 2 изготавливают в разъемной пресс-форме 1, рабочая полость которой имеет конфигурацию отливки с припусками на усадку и механическую обработку. Модель изготавливают из материалов, имеющих невысокую температуру плавления (воск, стеарин, парафин). Готовые модели или звенья собирают в блоки 3 имеющие модели элементов литниковой системы из того же материала, что и модели. Блок моделей погружают в емкость с жидкой формовочной смесью – суспензией для оболочковых форм, состоящую из пылевидного огнеупорного материала и связующего. В результате, на поверхности модели образуется тонкий слой суспензии 4.

Для упрочнения этого слоя, увеличения его толщины на него наносят слой огнеупорного зернистого материала 5 мелкой фракции. Операция нанесения суспензии и обсыпки поверхности до получения на модели оболочки требуемой толщины (3-10 слоев). Каждый слой покрытия высушивают на воздухе или в парах аммиака 6. После сушки оболочковой формы, модель удаляют из нее выплавлением в горячей воде или горячим воздухом 7 (температура 80-100 0С). Для упрочнения перед заливкой оболочковую форму помещают в контейнер, засыпают огнеупорным материалом и для упрочнения связующего помещают в печь 9; для прокаливания при температуре 950-1000 0С. Прокаленную форму извлекают из печи и заливают расплавом.

После затвердевания и охлаждения отливки до заданной температуры форму выбивают, отливки очищают от остатков керамики и отрезают от них литники.

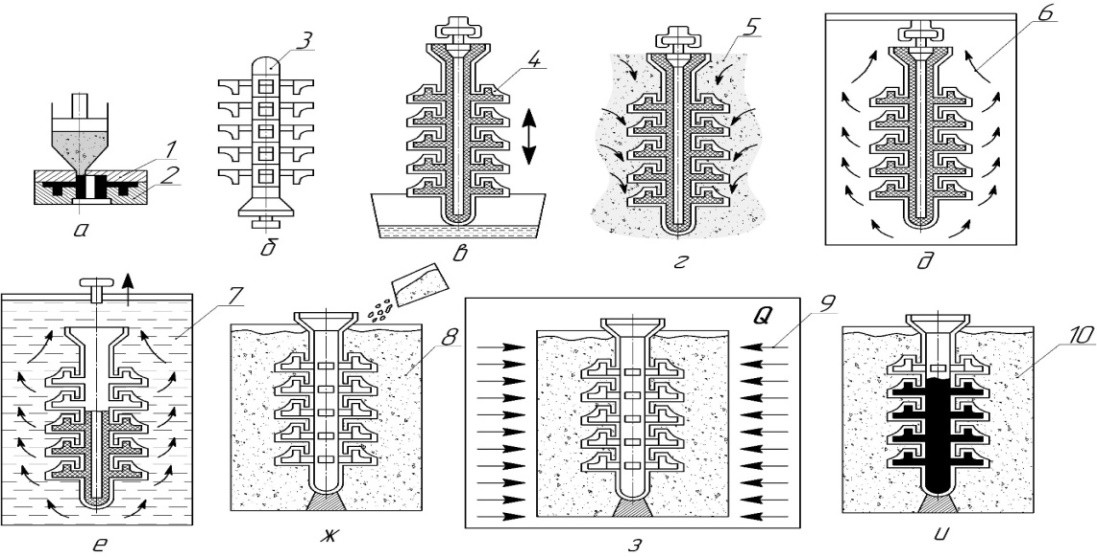


Рисунок — Последовательность изготовления многослойной оболочковой формы по выплавляемым моделям: а – изготовление модели; б – сборка блока; в — погружение блока в жидкую смесь; г – обсыпка; д – сушка; е – удаление модели; ж – засыпка; з – прокаливание; и – заливка; 1 – пресс-форма; 2 – модель; 3 – блок моделей; 4 – оболочка; 5 – огнеупорный материал; 6 – воздушный поток; 7 – вода; 8 – наполнитель; 9 – печь; 10 – прокаленная форма

Требования предъявляемые к модельным составам

Качество модели зависит от состава и технологии приготовления модельного состава.

Для получения моделей используют различные модельные составы: выплавляемые, растворяемые, выжигаемые. Любой модельный состав должен удовлетворять определенным требованиям.

В расплавленном состоянии модельный состав должен обладать хорошей жидкотекучестью для четкого воспроизведения конфигурации модели при заполнении полости пресс-формы и легкого и полного удаления из оболочковой формы. Температура его должна быть не высока (60-80 0С). Температура размягчения должна быть 35-45 0С, т. е. превышать температуру помещения. Усадка состава при охлаждении и его расширении при нагреве должна быть минимальна и стабильна, чтобы точность моделей и соответственно отливок были высокой. Модельный состав не должен прилипать к поверхности пресс-формы; химическое взаимодействие его с металлом пресс-формы недопустимо. После заполнения и затвердевания в пресс-форме модельный состав должен быть прочным и твердым, достаточным и для того, чтобы модели не деформировались и ломались на последующей операции технологического процесса.

Модельный состав должен обеспечивать соединение частей модели, либо сборку в блоки пайкой или склеиванием. Модельный состав должен смачиваться суспензией, но не растворяться в составляющих суспензии, не вступать с ней в химическое взаимодействие. Плотность состава должна быть минимальна, что облегчает работу с моделями, блоками моделей, особенно при больших их размерах. Считают, что плотность модельного состава должна быть менее 1000 кг/м3. Свойства модельного состава не должна изменяться при повторном использовании. Модельный состав должен быть безвредным для работающих и окружающей среды. Он не должен содержать дефицитных компонентов, и технология его приготовления и изготовляемая из него модель должна быть простой.

В зависимости от требований к качеству отливок, характера производства те или иные свойства модельного состава становятся определяющими. Поэтому, в соответствии с конкретными условиями производства применяют различные модельные составы.

Модельные составы и их свойства

Модельные составы классифицируются:

* по составу в зависимости от содержания основных компонентов, от прочности, температуры плавления и размягчения;
* по состоянии при введении в пресс-форму – жидкие, пастообразные, твердые;
* по способу удаления из оболочковой формы – выплавляемые, растворяемые, выжигаемые, испаряемые.

В зависимости от требований к качеству отливок, серийности производства используют различные модельные составы.

Парафиностеариновые модельные составы (ПС)

Приготавливают на основе парафина и стеарина. Эти модельные составы относятся к легкоплавким. Составы ПС хорошо смачиваются суспензией на связующих растворах этилсиликата. Они имеют невысокую температуру плавления (50-60 0С), низкую зольность, достаточную жидкотекучесть, однако низкую температуру размягчения, невысокую прочность (1,6-2 МПа) и твердость, нестабильную и высокую усадку, пригодны для многоразового использования (до 98% возврата). Наиболее часто используют ПС 50-50, реже 70-30. Модельные составы ПС используются в жидком и пастообразном состоянии. В жидком состоянии модельный состав заливают в пресс-форму. Шероховатость модели при таком способе их изготовления получается хороший, но модели имеют усадочный дефект.

Для устранения усадочных дефектов в модельный состав при его изготовлении замешивают 7-10 % по объему воздуха. После запрессовки пасты в пресс-форму и снятия давления, содержащийся в пасте воздух стремится расшириться и компенсировать усадку модельного состава. Эти модельные составы обладают хорошими технологическими составами и широко используются в массовом автоматизированном производстве.

Парафиностеариновые составы с добавками.

Для повышения прочности и температуры размягчения в парафиностеариновые составы вводят 2-3 % этилцеллюлозы или до 20% буроугольного воска. Для повышения пластичности в составы ПС вводят пластифицирующие добавки: 3-8 % кубового остатка термического крекинга парафина или церезина. Для изготовления моделей их используют в пастообразном или в жидком состоянии.

**Парафино-церезиновые модельные составы (ПЦ)** с добавлением буроугольного или торфяного воска обладают высокой прочностью и теплостойкостью. Эти модельные составы обычно используются в пастообразном состоянии. К ним относятся: Р-1; Р-3А (ПЦБКУ 60-22-12-6). Они имеют прочность на изгиб 3-4 МПа, температуру запрессовки 54-55 0С, усадки 0,8-1,1 %. Эти составы широко используются в массовом автоматизированном и серийном производстве отливок общего машиностроения.

Составы на основе канифоли и полистирола

Они относятся к тугоплавким высокопрочным. Усадка: ок. 1,0 %; σиз =7-8 МПа. Применяются для изготовления особоточных сложных моделей лопаток газовых турбин. Составы КПCЦ (с церезином) и КПCП (с парафином) имеют низкую жидкотекучесть и поэтому возврат составляет 60%; высокая вязкость их требует повышенного давления прессования (0,6-1,0 МПа).

**Составы на основе карбамида** имеют малую и стабильную усадку, поэтому их применяют для изготовления моделей тонкостенных точных крупногабаритных отливок. Основным компонентом служит карбамид CO(NH2)2 – техническая мочевина.

Карбамид плавится при температуре 119 0С, хорошо растворяется в воде, имеет высокую жидкотекучесть, затвердевает и охлаждается практически без усадки. В качества пластификатора дают 0,3-3,0% борной кислоты. Распространенным растворимым модельным составом является КбБК-98-2.

Выжигаемые модельные составы

Наибольшее распространение получил полистирол ПСВ-ЛД и блочный полистирол с добавками. Полистирол ПСВ-ЛД – вспенивающаяся композиция, из которой изготавливаются модели с использованием термопластавтоматов. Плотность модели 0,25-0,3 г/см3; σиз = 10-14 МПа, усадка 0,2-0,3%.

Такие модельные составы используют для изготовления моделей мелких и средних отливок в массовом и крупносерийном производстве.

Приготовление модельных составов.

Легкоплавкие модельные составы приготовляются расплавлением составляющих в вакууме и масляных банях с электрическим обогревом. Исходные материалы перед загрузкой измельчают размером до 30-50 мм. Материал загружают в порядке возрастания их температуры плавления или растворимости. Расплавленный модельный состав перемешивают и фильтруют через металлическую сетку 0,2.

**Парафиностеариновые составы с добавками,** составы с буроугольным воском (Р-3), перемешивают особенно тщательно.

**Пастообразные модельные составы** приготавливаются охлаждением жидкого состава при непрерывном перемешивании в специальных смесителях. Воздух замешивается в модельный состав в количестве 8-12 % по объему. Для этого используются лопастные, поршневые, шестеренчатые смесители.

**Тугоплавкие модельные составы** приготавливают в тигельных поворотных электропечах с терморегуляторами. Тигли изготавливают из коррозионно-стойких сталей, не взаимодействующих с модельным составом. Для приготовления модельных составов типа КПСЦ сначала растворяют церезин, затем вводят канифоль, нагревают состав до 140-150 0С, фильтруют расплав, нагревают его до 220 0С и постепенно засыпают полистирол, перемешивая расплав. Затем модельный состав выдерживают 30-40 мин, охлаждают до 180 0С, снова выдерживают до полного выделения пузырьков газа и заливают в пресс-форму.

Растворяемые модельные составы приготовляют сплавлением составляющих в тигельных электропечах. Перед расплавлением карбамид высушивают при температуре 100-110 0С. Высушенную соль расплавляют вместе с пластификатором (борной кислотой), в металлических тиглях из коррозионно-стойкой стали при температуре 120-130 0С . Расплав фильтруют и заливают в пресс-формы. Карбамидные составы гигроскопичны, поэтому должны храниться в сухом месте.

**Выжигаемые модельные составы** приготовляют перемешиванием гранул вспенивающего полистирола ПСВ со смачивателем и пластификатором. В начале в гранулы вводят 10% спиртовой раствор бутилового эфира, стеариновой кислоты в количестве 0,03-0,05 % от массы полистирола, тщательно перемешивают и затем вводят 0,003-0,005% 1%-го раствора смачиваем НБ или 0,01-0,03% 10%-го водного раствора полиэтиленоксида.

Пресс-формы

**Пресс-форма** – это инструмент для изготовления моделей. От точности модели зависит точность размеров полости формы и соответственно размеров отливки.

Точность размеров модели и качество воспроизведения ее конфигурации зависит от точности от размеров полости пресс-формы и ее конструкции: чем меньше разъемов имеет пресс-форма, тем выше точность моделей.

Для хорошего заполнения полости пресс-формы модельным составом она должна иметь соответствующую литниковую систему, а для удаления воздуха из полости пресс-формы при заполнении ее модельным составом – вентиляционную систему.

Конструкция пресс-формы должна быть такой, чтобы модель можно было легко и быстро, без деформаций и повреждений извлечь из рабочей полости пресс-формы.

Большинство модельных составов имеют плохую теплопроводность и поэтому медленно охлаждаются в пресс-форме. Для ускорения охлаждения в пресс-формах устраняется система охлаждения воздухом или водой. Пресс-форма должна обладать необходимой долговечностью, простую конструкцию, а материал для нее должен быть не дефицитным.

Изготовление моделей

Процесс изготовления моделей включает подготовку пресс-формы, заполнение пресс-формы модельным составом; выдержка для затвердевания и охлаждения модели; выдержка модели до окончательной усадки.

**Подготовка пресс-формы.** Рабочую полость и поверхность разъема пресс-формы очищают от остатков модельного состава, наносят на поверхность рабочей полости смазочный материал – трансформаторное масло – или распыляют сжатым воздухом эмульсию (касторовое масло + спирт в соотношении 1:1 по массе) смазывающий материал должен наноситься равным слоем.

Крупные и сложные пресс-формы смазывают перед каждой операцией. При изготовлении из пастообразных составов на парафиновой основе мелких не сложных моделей, возможно периодическое смазывание пресс-формы через 10-12 запрессовок.

Температура пресс-формы оказывает важное значение на качество моделей. Пресс-формы перед началом работы обычно нагревают введением в них модельного состава, при этом первые порции направляют на переплав.

Оптимальная температура пресс-форм для парафино-стеариновых составов находится в пределах 22-28 0С. По мере работы пресс-форма перегревается выше указанной температуры. Поэтому ее необходимо охлаждать обдувом воздухом, поливанием водой, погружением в воду, пропусканием воды через специальные полости в пресс-форме.

Изготовление моделей осуществляется следующим способами:

1. Изготовление моделей запрессовкой из пастообразных составов содержащих воздух. Пастообразные составы запрессовываются с помощью различных устройств – от ручных шприцов до сложных многопозиционных машин-автоматов.

В цехах серийного производства для изготовления моделей из пастообразного состава применяют малогабаритные установки, состоящие из пастоприготовительного и запресовочного устройства. Последнее состоит из прессующего цилиндра или шестиренчатого насоса и обогревающего гибкого шланга со шприцем на его конце. Обычно применяют шланги пистолетного типа различных конструкций.

В связи с развитием массового производства литья по выплавляемым моделям в крупных цехах массового производства мелких, преимущественно стальных отливок широкое применение получили автоматические установки для изготовления моделей из пастообразных составов. Они включают агрегаты для плавления компонентов модельного состава, приготовления модельной пасты и запресовочное устройство, объединенное с карусельным столом в один автоматический агрегат.

Продолжительность выдержки модельного состава под давлением составляет от нескольких секунд до 4-5 минут; ее выбирают с учетом температуры и свойств модельного состава, формы и размеров модели, размеров литникового хода в пресс-форме. Оно должна быть не более того времени, в течение которого модельный состав полностью затвердеет в литниковом канале пресс-формы.

Для запрессовки применяют рычажные, винтовые, пневматические и гидравлические прессы. Наибольшее распространение получили пневматические настольные прессы с давлением сжатого воздуха 0.4-0.6 МПа.

2. Изготовление формы методом свободной заливки. При получении сплошной модели этот метод малопроизводителен и не обеспечивает требуемой точности, поэтому имеет ограниченное применение. Однако при изготовлении полых моделей этот метод является простым и не имеет указанных недостатков.

Сложные тонкостенные и крупные модели из парафиновых составов отливают при температуре 80-900С, средние по размерам и сложности модели при 70-750С.

При охлаждении и затвердевании в пресс-форме уровень расплава в воронке быстро снижается и для компенсации усадки необходимо доливать модельный состав. Литниковый ход в пресс-форме следует выполнять достаточно массивным и коротким и простым по форме.

Сборка моделей в блоки

Готовые модели после извлечения их из пресс-формы подвергаются искусственному охлаждению в проточной воде или обдувкой воздухом или естественное охлаждение до 20 0С. Модели необходимо выдерживать до полного их охлаждения и прекращения усадки. Обычно на воздухе модели охлаждаются от 1 до 5 часов, а иногда и больше (6-8 часов).

В целях предотвращения коробления сложных по форме моделей не имеющих опорной плоскости их следует хранить на специальных подставках.

В летнее время при высокой температуре окружающей среды модели необходимо хранить в помещении с искусственным охлаждением или в термостатах, а также в металлических шкафах охлаждаемых проточной водой.

Отделка моделей и подготовка в блоки состоит в зачистке заусенцев и посадочных частей питателей, а также обдувке сжатым воздухом для удаления с поверхности прилипших частиц модельного состава, следов смазочного материала пресс-формы и влаги.

После подготовки по мере необходимости модели собирают в блоки.

Различают следующие способы сборки моделей в блоки:

* припаивание моделей деталей к модели литниковой системы с помощью подогретого ножа или специального электропаяльника;
* соединение моделей в кондукторе с одновременной отливкой моделей литниковой системы или топкой жидким модельным составом моделей и литниковой системы;
* механическое скрепление моделей отливок с моделью литниковой системы;
* прикрепление моделей отливок к модели литниковой системы.

После сборки моделей методом спаивания, особенно при одновременной отливке элементов литниковой системы, необходима выдержка для полного охлаждения всех частей модельного блока до температуры производственного помещения.

Для естественного охлаждения и хранения блоков перед нанесением оболочки их устанавливают или подвешивают на стеллажи, этажерки, подвесные конвейеры, ставят в шкафы или термостаты. Устройства для хранения модельных блоков изготавливают и устанавливают так, чтобы исключалась опасность поломки моделей и загрязнения их поверхности. Не допускается коробление при колебании температуры.

Формирование оболочки

Формирование оболочек включает: приготовление связующего и суспензии, смачивание ею блоков моделей, обсыпка блоков зернистым огнеупором, сушка блоков. Основным связующим является этилсиликат ЭТС. Связующее получают путем гидролиза ЭТС, для чего вводят воду. **Гидролиз** – это процесс замещения содержащихся в ЭТС этоксильных групп (C2H5O) гидроксильными (OH) содержащимися в воде:

*(C2H5O)4 Si+2H2O = SiO2+4C2H5OH*

ЭТС и вода не растворяются (в воде и друг в друге) при смешивании они расслаиваются. ЭТС и вода, а также продукты гидролиза хорошо растворяются в спиртах и ацетоне. Поэтому гидролиз и ЭТС для получения связующего проводит подкисленным раствором воды в спирте или ацетоне.

Для интенсификации гидролиза применяют катализатор – соляную кислоту.

Связующие растворы обычно готовят в смесителях с частотой вращения крыльчатки 2800 об/мин

В этих же или им подобных смесителях готовят и суспензию.

Обычно для гидролиза ЭТС используют нескольких способов: раздельным и совмещенным. Наибольшее применение получил совмещенный способ.

Совмещенный способ гидролиза заключается в том, что реакция гидролиза и приготовление суспензии совмещены. Для этого в бак гидролиза заливают в расчетном количестве растворитель, подкисленную воду (H2O+HCl), ЭТС и загружают пылевидный кварц (ПК-2) в количестве 2/3 расчетного. Компоненты загружают при непрерывной работе машины. Перемешивают суспензию 40-60 мин при непрерывном охлаждении бака гидролизера проточной водой.

Для полного протекания реакции гидролиза мешалки должна иметь частоту вращения не менее 2800 об/мин затем контролируют вязкость суспензии и доводят ее до требуемой дозагрузкой пылевидного кварца. Общее количество пылевидного кврца 2,5-3 части по массе на 1 кг раствора.

Количество воды должно быть таким, чтобы раствор содержал 14-16 % SiO2. Соляную кислоту вводят из расчета 0,5-0,8 к связующему, в качестве катализатора вводят серную кислоту в количестве 0,5-0,7%. Состав суспензии: ЭТС 12-14%; ацетон: 16-18%; спирт: 6-8%; кварц: 55-60%; соляная кислота: 0,3-0,5%.

Изготовление блоков

Суспензию наносят на блоки моделей окунанием их в ванну с суспензией (**Состав суспензии**: ЭТС 12-14%; ацетон: 16-18%; спирт: 6-8%; кварц: 55-60%; соляная кислота: 0.3-0.5%), а на крупные блоки моделей – обливанием. Вынутый из суспензии блок моделей медленно поворачивают в различных направлениях так, чтобы суспензия равномерно распределялась по поверхности моделей, а излишки ее стекли. После этого слой суспензии сразу обсыпают песком; между нанесением суспензии и обсыпкой песком должно быть не более 10 сек. Суспензию в ванне непрерывно перемешивают с небольшой скоростью. Для нанесения песка на слой суспензии используют погружение блока в слой «кипящего песка».

Сушка оболочек

После нанесения каждого блока суспензии и обсыпки ее высушивают в потоке воздуха или в парах аммиака. Продолжительность сушки и обсыпки каждого слоя суспензии на воздухе 2-4 ч, а в парах 50-60 мин, из них 20-30 мин сушки на воздухе, 10-20 мин в парах аммиака и 10-20 мин выветривание паров аммиака.

Удаление моделей

В зависимости от материала модели используют различные способы их удаления из оболочки.

Модели из выплавляемых воскообразных составов удаляют из формы погружением блока моделей в горячую воду или в ванну с модельным составом. Возможно удаление выплавляемых моделей в паровых автоклавах или горячим воздухом. Эти способы вследствие больших потерь модельного состава, сложности оборудования применяют редко.

Растворяемые и карбамидные составы растворяют в воде при температуре 120-130 0С.

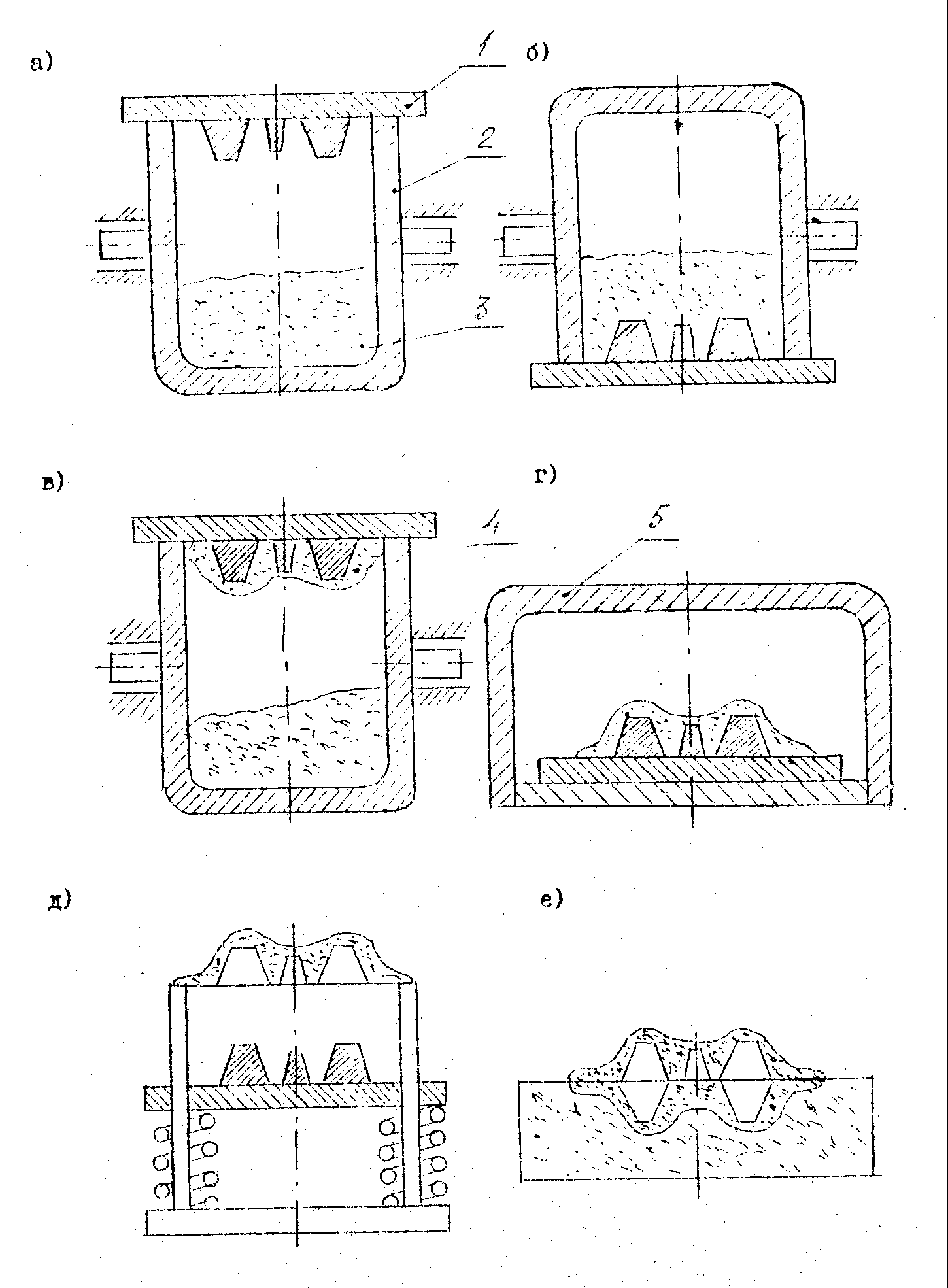
Пенополистироловые модели могут быть удалены из формы путем нагрева ее вместе с моделями блока или растворимым. Растворением пенополистироловых моделей растворяют в бензоле, талуоле, ацетоне.

Формовка

Для предотвращения разрушения оболочковой формы при заливке ее заформовывают в сыпучий огнеупорный материал (сухой кварцевый песок, шамотный порошок, остатки размолотых и просеянных через сито с ячейкой 2 мм оболочек). Формовку можно производить в холодном и горячем состоянии. В массовом производстве обычно применяют второй способ. В этом случае оболочковые формы сначала прокаливают, и сразу после этого их заформовывают в предварительно нагретом сыпучем огнеупорном материале.

**Прокаливание оболочковых форм** необходимо для полного удаления из формы остатков модельного состава, испарения остатков воды и пузырьков неполного гидролиза связующего, а также спекания связующего и огнеупорного покрытия, при этом за счет образующихся пор и микротрещин возрастает газопроницаемость оболочек.

Оболочковые формы без опорных материалов загружают в печь при температуре 600 0С и затем нагревают до 1000 0С и прокаливают в течение 0,5-1,0 часа. Заформовывание в сыпучий материал. Загружают в печь при температуре 400 0С, нагревают до 900-1000 0С и дают выдержку общая продолжительность прокаливания формы 6-8 часов.



**Рис.** Схема процессов изготовления оболочковых форм

Заливка форм, выбивка и очистка отливок

Заливка форм

Температура форм перед заливкой зависит от толщины стенок и материала отливок. Обычно расплав заливают в горячие формы (850-400 0С) сразу после их прокаливания.

Стали и жаропрочные стали для тонкостенных отливок заливают при 1520-16000С, алюминиевые – при 700-8000С, при изготовлении отливок с массивными стенками расплав заливают охлажденным на 200-400 0С.

Выбивка форм

Оболочковые формы без опорного материала после заливки и охлаждения отливки поступают на предварительную очистку. Формы упрочняются сыпучим материалом, легко выбиваются при опрокидывании контейнеров на провальную решетку, а формы с жидким упрочняющим материалом выбивают на выбивных решетках.

**Предварительную очистку** отливок от оболочковой формы осуществляют на выбивных установках. В некоторых случаях возможно совмещение операций очистки и отделения отливки от стояка.

**Отделение стояков и литников** от отливки выполняют разными способами в зависимости от состава сплава, типа производства, размеров отливки и конструкции литниково-питающей системы. На виброустановках крупные толстостенные отливки из углеродистых сталей; отрезаются от отливок на металлорежущих станках; применяют в единичном и мелкосерийном производстве; отделение отливок на прессах широко применяют в крупносерийном и массовом производстве отливок небольшой массы (до 5 кг) из углеродистых и низколегированных сталей; газовую резку; анодно-механическая резка.

**Окончательная очистка отливок,** применяют механический способ (дробеметная или дробеструйная, гидроабразивный, электроискровой и химический способ). Химический способ применяется в массовом производстве мелких стальных отливок, очистку ведут в горячих водных растворах 45-50% щелочей при температуре раствора 90-950С. При этом кремнезем формы SiO2 взаимодействуют со щелочью по реакции:

2KOH+SiO2 = K2SiO3+H2O

Условия заполнения формы и кристаллизация металла при литье по выплавляемым моделям

Конфигурация свободной поверхности жидкого металла в полости литейной формы определяется в основном действии силы тяжести, обуславливающей наличием горизонтального участка поверхности и силы поверхностного натяжения, вызывающего образование выпуклого мениска размером RМ вблизи стенки формы.

Для «толстых стенок» должно соблюдаться условие:

aст = > 2 RМ\*cos (180-θ)

При уменьшении ширины полости формы до

aст = < 2 RМ \*cos (180-θ)

горизонтальный участок свободной поверхности жидкого металла исчезает (Рис)

Для преодоления сопротивления поверхностного натяжения мениска при отсутствии прямого участка требуется приложение значительных усилий, что существенно затрудняет заполнение узких полостей формы и объясняет недоливом тонких стенок.

Для заполнения формы необходимо обеспечить условия, при которых весь процесс заполнения завершался до начала образования корки на переднем конце потока.

Чтобы обеспечить заполнение металлом узкой полости, необходимо создать определенный гидростатический напор НP, который согласно известной формуле равен:



*σ* – поверхностное натяжение, для жидкой среды углеродистой стали величина составляет примерно 1500 дин/см

*aст* – толщина стенки отливки

*γ* – плотность расплава

*g* – ускорение силы тяжести

*θ* – краевой угол смачивания, для стали можно применять 1800

При недостаточном питании в отливках в период кристаллизации развивается пористость и резко снижаются механические свойства. Поэтому в период кристаллизации необходимо обеспечить питание отливкам жидким металлом. Питание отливок можно осуществить не только сверху или сбоку, но и снизу.

При этом направление подвода металла не имеет существенного значения, если только в питаемом элементе в период затвердевания действует необходимый гидравлический напор, и на жидкий металл прибыли действует атмосферное давление.

При затвердевании отливок, расположенных на одинаковой высоте (Рис), напор изменяется примерно в одинаковых пределах. Только при питании сверху максимальный напор имеется вначале затвердевания, а минимальный – в конце, а при питании снизу – наоборот.

Для получения отливок без усадочных дефектов важно, чтобы гидростатический напор не был ниже определенной величины НP мин.

Естественно, что при изготовлении отливок по выплавляемым моделям из углеродистой стали необходимо, чтобы соблюдались условия:

НP мин ≥ 60 мм

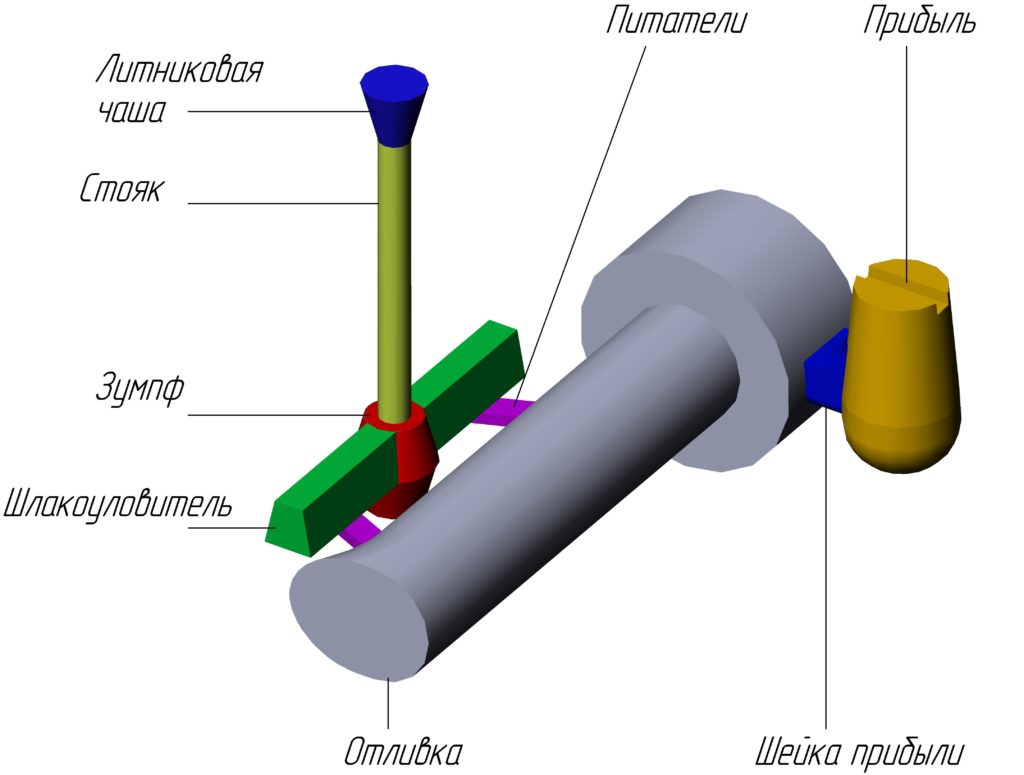
Назначение, проектирование и расчет литниковой системы

Правильно построенная литниково-питающая система при литье по выплавляемым моделям должна удовлетворять следующим основным требованиям:

1. Обеспечивать заполнение формы металлом, улавливание загрязнений и питание отливок в процессе их затвердевания.
2. Способствовать получению отливок с точными размерами, без поверхностных дефектов в виде засоров, шлаковых вкраплений и т д.
3. Обеспечивать технологичность блока моделей и отливок на всех операциях технологического процесса, вплоть до отрезки от литниковой системы.
4. Обеспечивать наибольший выход годного литья и высокую производительность процесса.

Проектирование литниково-питающей системы на конкретную деталь состоит из 2-х этапов: выбор конструктивного варианта и определения конструктивных размеров. При этом выбор конструктивного варианта литниково-питающей системы является решающим этапом, на котором определяются узлы отливки, требующие самостоятельного питания, наиболее рационального положения отливок и литниково-питающей системы с точки зрения заполнения и питания, использования имеющегося в цехе оборудования и оснастки, удобства выполнения технологических операций.

На основании произведенного опыта применяются 3 конструктивных варианта литниково-питающих систем. (**Рис.** Литниково-питающие системы типа 1).



*Рис. Литниково-питающая система*

Заполнение литейной формы металлом может осуществляться: сверху, снизу, сбоку или комбинированно. Эти литниковые системы получили наибольшее распространение для отливок массой до 1.5 кг из стали и медных сплавов. При этих системах создаются благоприятные условия для направленного затвердевания отливок и получения плотных литых изделий.

**Недостатком литниково-питающей системы типа 1** является отсутствие элементов, задерживающих шлак, и элементов, регулирующих скорость заполнения формы. Однако, применение чайниковых разливочных ковшей, предотвращает попадание шлака в форму, а скорость заполнения формы металлом практически регулируется размерами стояков и коллекторами.

Конструкция литниковой системы типа 1 обычно является простой и технологичной. Такая система особенно широко применяется для мелких отливок с одним или двумя узлами питания.

**Тип 2. Стояк в комбинации с местными прибылями.** Эти литниково-питающие системы (Рис.) получили распространение при изготовлении сложных фасонных отливок. Металл обычно заполняет форму снизу, благодаря чему обеспечивается получение качественных деталей из различных сплавов, в том числе и из высоколегированных сталей и никелированных сплавов с большим содержанием хрома.

**Тип 3. Массивная прибыль. (Рис.)** Металл непосредственно из ковша подается в массивную прибыль.

Эти системы применяются для деталей типа рабочих колес с лопаткой или лопастями из высоколегированной стали и жаропрочных сплавов.

Для расчета литниково-питающих систем при литье по выплавляемым моделям используются 2 метода- метод расчета по модулям охлаждения методом вписанных сфер, в основу которых положено условие обеспечения надежного питания отливок в процессе затвердевания.

Метод расчета по модулям охлаждения применяется главным образом для литниково-питающих систем типа 1, как наиболее широко применяемых для массовых отливок весом до 1.5 кг.

Исходными данными для определения размеров элементов литниково-питающих систем являются модуль охлаждения массивного узла отливок (узла питания) и вес отливки.

Расчет размеров питателя или стояка производится по формуле:

 или 

*δп* – модуль охлаждения сечения питателя (отношение площади сечения питателя к его периметру)

*δст* – модуль охлаждения стояка (отношение площади сечения стояка к его периметру)

*Z* – модуль охлаждения узла отливки (по формулам таблицы)

*G* – вес отливки, кг

*lп* – длина питателя, мм

В формуле через модули охлаждения δп, δст; Z, а так же вес отливки G отражена зависимость между размерами литниковой системы и размерами узлов питания (термических узлов), а также между размерами самих элементов литниковой системы (стояка и питателя).

Чем меньше длина питателя, которая выбирается в зависимости от способа отрезки от литниковой системы, тем меньше может быть площадь сечения стояка. Здоровые отливки можно получать только при условии, что модуль охлаждения сечения стояка больше модуля охлаждения массивных отливок, так как при этом обеспечивается направленное затвердевание от отливки к стояку. При этом расстояние от верхнего уровня литниковой воронки до верхнего уровня отливки должно быть не менее 60 мм.

При определении размеров стояков по формуле необходимо учитывать, что нерационально применять стояки, диаметром меньше 20 мм и больше 65 мм. В первом случае создаются значительные трудности при отрезке отливки из-за недостаточной прочности стояка ослабленного усадочными раковинами, а во втором – получаются громоздкие и тяжелые блоки, что усложняет работу на всех последующих операциях.

Рассчитанные по выше приведенной формуле размеры литниково-питающей системы сведены в таблице. При определении размеров литниковой системы имеющих 2 и более массивных узла, расчет по формуле и таблице производится отдельно для каждого узла питания с учетом веса той части отливки, которая питается через данный узел питания.

Таблица. Дст и δп в зависимости от Z и G

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Вес | Характери-зуемый  параметр Дст | Значение характеризующих параметров, мм при модулях охлаждения массивных узлов отливки (в мм) | | | | | | | | | | |
| 1,1 | 1,8 | 2,5 | 3,0 | 3,5 | 3,9 | 4,2 | 4,6 | 5,1 | 5,8 | 6,7 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 10 | 11 |
| До 50 | δп при lп=4 мм;  δп при lп=8 мм; | 20  1,75  2,0 | 20  2,5  3,0 | 25  2,5  3,2 | 25  3,0  3,5 | 30  3,0  3,75 | -  -  - | -  -  - | -  -  - | -  -  - | -  -  - | -  -  - |
| 59-100 | δп при lп=4 мм;  δп при lп=8 мм; | 20  2,0  2,5 | 20  2,75  3,5 | 25  3,0  3,75 | 30  3,0  3,5 | 30  3,5  4,3 | 30  3,75  4,75 | 30  4,0  5,0 | 35  3,5  4,5 | -  -  - | -  -  - | -  -  - |
| 100-200 | δп при lп=4 мм;  δп при lп=8 мм; | 20  2,5  3,0 | 25  2,75  3,5 | 30  3,0  3,75 | 30  3,75  4,25 | 35  3,5  4,5 | 35  3,75  4,75 | 40  4,0  5,0 | 40  4,25  5,25 | 40  4,5  5,75 | 45  4,5  5,8 | 45  5,0  6,25 |
| 200-300 | δп при lп=4 мм;  δп при lп=8 мм; | 20  2,75  3,25 | 25  3,0  3,75 | 30  3,25  4,0 | 30  3,75  4,75 | 35  3,75  4,75 | 35  4,25  5,25 | 40  4,0  5,0 | 40  4,25  5,25 | 40  4,5  5,75 | 45  4,5  5,5 | 45  5,0  6,25 |
| 300-500 | δп при lп=4 мм;  δп при lп=8 мм; | -  -  - | -  -  - | 30  3,75  4,5 | 35  3,75  4,5 | 35  4,5  5,5 | 40  4,25  5,25 | 40  4, 5  5,5 | 20  4,75  6,0 | 40  5,0  6,5 | 45  5,0  6,5 | 50  5,0  6,25 |
| 500-750 | δп при lп=4 мм;  δп при lп=8 мм; | -  -  - | -  -  - | 30  4,0  5,25 | 35  4,0  5,0 | 40  4,25  5,5 | 40  4,5  5,75 | 40  5,0  6,25 | 40  5,75  6,5 | 45  5,0  6,25 | 45  5,5  7,0 | 50  5,5  7,0 |
| 750-1000 | δп при lп=4 мм;  δп при lп=8 мм; | -  -  - | -  -  - | -  -  - | -  -  - | 40  4,75  5,75 | 40  5,0  6,25 | 40  5,25  6,5 | 45  5,0  6,25 | 45  5,5  6,75 | 45  6,0  7,5 | 50  6,0  7,5 |
| 1000-1500 | δп при lп=4 мм;  δп при lп=8 мм; | -  -  - | -  -  - | -  -  - | -  -  - | -  -  - | -  -  - | 45  5,25  6,5 | 45  5,5  7,0 | 50  5,5  6,75 | 50  6,0  7,5 | 55  6,0  7,5 |

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 10 | 11 |
| 1500-2000 | δп при lп=4 мм;  δп при lп=8 мм; | -  -  - | -  -  - | -  -  - | -  -  - | -  -  - | -  -  - | -  -  - | 45  6,0  7,5 | 50  5,75  7,25 | 50  6,5  8,0 | 55  6,5  8,0 |
| 2000-2500 | δп при lп=4 мм;  δп при lп=8 мм; | -  -  - | -  -  - | -  -  - | -  -  - | -  -  - | -  -  - | -  -  - | -  -  - | 50  6,0  7,75 | 55  6,25  7,75 | 60  6,25  7,75 |
| 2500-3000 | δп при lп=4 мм;  δп при lп=8 мм; | -  -  - | -  -  - | -  -  - | -  -  - | -  -  - | -  -  - | -  -  - | -  -  - | -  -  - | 55  6,5  8,0 | 60  6,5  8,0 |
| 3000-3500 | δп при lп=4 мм;  δп при lп=8 мм; | -  -  - | -  -  - | -  -  - | -  -  - | -  -  - | -  -  - | -  -  - | -  -  - | -  -  - | -  -  - | 60  6,75  8,5 |

Приняв и определив Zнаходим**,** из формулы: 

Центробежное литье

Сущность способа, основные операции, область применения

**Центробежное литье** – это способ изготовления отливок, при котором заполнение формы расплавом и его затвердевание происходит в поле действия центробежных сил.

Чаще используют 2 варианта способа, при которых расплав заливается в форму с горизонтальной осью вращения или с вертикальной осью вращения.

В первом случае получают отливки – тела вращения малой и большой протяженности; во втором – отливки тела вращения малой протяженности и фасонные.

Формы приводятся во вращение машинами называемыми **центробежными.**

Наиболее распространенный способ литья во вращающиеся металлические формы с горизонтальной осью вращения. По этому способу (Рис. Схема получения отливок при вращении формы вокруг горизонтальной оси) отливка формируется со свободной поверхностью в поле центробежных сил, а формообразующей поверхностью служит внутренняя поверхность изложниц.

Расплав из ковша 3 заливают во вращающуюся форму 5 через заливочный желоб 2. Расплав 1 растекается по внутренней поверхности формы, образуя под действием центробежных сил пустотелый цилиндр.

После затвердевания металла и остановки вращения отливки извлекается из формы. Такой способ характеризуется наиболее высоким ТВГ (ок. 100 %), т. к. не расходуется металл на литники.

При получении отливок со свободной поверхностью при вращении формы вокруг вертикальной оси (Рис. Схема получения отливок при вращении формы вокруг вертикальной оси).

Расплав из ковша 1 заливается в фору 2. Расплав 3 под действием центробежных сил отбрасывается к стенкам формы 2 и затвердевает, после чего машину останавливают и вынимают затвердевшую отливку 4.

Отливки с внутренней поверхностью сложной конфигурации получают с помощью стержней (Рис. Схема получения отливок; а) венцов шестерней; б) мелких фасонных отливок) в формах с вертикальной осью вращения. Так отливают венцы зубчатых колес.

Расплав из ковша через заливочное отверстие и стояк 1 попадает в центральную часть полости формы 2, выполненную стержнями 3-4. Затем через щелевые питатели расплав под действием центробежных сил поступает в полость формы. ТВГ здесь меньше, чем в предыдущем способе. Избыток 5 расплава в центральной полости 2 формы служит прибылью и питает отливки при затвердевании.

Малые фасонные отливки изготавливаются по варианту (Рис. б), в котором применяют, например песчаную форму. Части формы 1 и 2 устанавливают на вращающийся стол. При необходимости используют стержни 4. Рабочие полости 3 должны располагаться симметрично для балансировки формы. Расплав заливают через центробежный стояк из которого по радиальным каналам он попадает в полость формы.

Особенности формирования отливки

Главная особенность процесса формирования отливки при центробежном способе литья заключается в том, что заполнение формы и затвердевание отливки приходит в поле действия центробежных сил, превосходящих силы гравитации.

Силы, действующие во вращающемся расплаве

Действие центробежного ускорения, приходящегося на единицу объема вращающегося расплава, выражается зависимостью



*ρ* – плотность расплава; г/см3;

*ω* – частота вращения формы; рад/сек;

*z* – радиус вращения произвольной точки расплава, см;

*g* – ускорение свободного падения, g = 981 см/с2.

Согласно принципу эквивалентности воздействия центробежных сил на какую-либо систему тождественно воздействию сил тяжести соответствующей величины.

Поэтому центробежные силы, действующие на расплав, можно заменить силами тяжести равной величины и того же направления, а сам расплав рассматривать утяжелившимся. Следовательно, величину PУ можно рассматривать как плотность расплавленного расплава, эту величину называют эффективной плотностью, а отношение *ω2z/g*, является коэффициентом пропорциональности между PУ и ρ, показывает, во сколько раз расплав утяжеляется в поле действия центробежных сил. Это отношение называют **гравитационным коэффициентом **

Статическое давление, действующее во вращающемся расплаве

Положим, что расплав вращается вместе с формой вокруг неподвижной оси, перпендикулярной к плоскости чертежа, с постоянной частотой вращения ω (Рис). Если расплав подвержен только действию центробежных сил, то он находится в состоянии покоя относительно формы и поэтому можно воспользоваться уравнениями гидростатики. При элементарном перемещении точки М в произвольном направлении в жидкой среде приращения давления определяется уравнением Эйлера:



*dx; dy; dz* –проекции перемещения точек;

*X; Y; Z* – объемные силы, действующие на рассматриваемую точку в направлении соответствующих осей. В радиальном направлении на точку М действует объемная сила *ρω2z/g*, составляющие которой по осям х=*ρω2x/g*; y=*ρω2y/g*; z = 0 (Рис. Схема к определению статического давления во вращающемся расплаве)

Так как х = *r ⋅ sinϕ* и y = *r ⋅ cosϕ* , то приращение давления в точке при ее элементарном перемещении составляет: *αP = (ρω2)⋅(Xdx+Ydy)*.

Интегрируя данное уравнение и округляя постоянную интегрирования, находим, что во вращающемся расплаве давление: *P = [ρω2/(2)]⋅(z2 – z02)*

Из этого уравнения следует, что в расплаве, вращающемся вместе с формой с постоянной частотой, давление изменяется пропорционально квадрату расстояния рассматриваемой точки от оси вращения, на свободной поверхности расплава при любой частоте вращения давления равно нулю.

Обычно в расплаве присутствуют инородные частицы. Если твердая или жидкая частица погружены в расплав и ее плотность отличается от плотности расплава, то действующее на частицу всестороннее давление не уравновешивается ее собственной центробежной силой. Поэтому частица перемещается в радиальном направлении в ту или иную сторону. Сила, по действием которой перемещается частица:

P = V ⋅ (ρ1 – ρ) ⋅ (ω2z)

*V* – объем частицы;

*ρ* – плотность частицы; при *ρ1* > *ρ* – сила положительна и частица движется от вращения к стенке формы; при обратном соотношении плотностей, частица перемещается к оси вращения и всплывает на свободную поверхность.

Если твердая частица касается стенки формы, то она прижимается расплавом к стенке и не всплывает; на этом явлении основано применение сыпучих материалов для покрытия металлических форм при центробежном литье.

Охлаждение и затвердевание отливки в поле центробежных сил

При изготовлении отливок со свободной поверхностью расплава он охлаждается в изложнице и не равномерно.

Неравномерность охлаждения отливки приводит к возникновению конвекции в расплаве. Охлажденный более плотный расплав перемещается к стенкам формы, а горячий и менее плотный – к свободной поверхности расплава.

Вследствие этого в расплаве возникают конвекционные потоки, циркулирующие в радиальном направлении (Рис.).

Это способствует направленному затвердеванию отливки в радиальном направлении и тем больше, чем больше частота вращения.

Свободная поверхность расплава затвердевает в последнюю очередь и остается геометрически правильной. Инородные частицы (газы, шлак и т. д) имеющую плотность меньшую, чем расплав, под действием силы, обусловленной разность плотностей и гравитационным коэффициентом, интенсивно всплывают на свободную поверхность расплава. Это приводит к необходимости назначать большие припуски на обработку свободных поверхностей отливок. (Рис. Схема возникновения конвективных потоков во вращающемся и затвердевающем расплаве).

Таким образом, направленное затвердевание позволяет получить отливки с плотным строением тела, без усадочных дефектов и инородных включений.

**Ликвация** сплавов под действием центробежных сил происходит при изготовлении отливок из сплавов, компоненты которых взаимно не растворимы и не образуют эвтектик, химических соединений. К последним сплавам например относится свинцовая бронза. Если сплав содержит компоненты взаимно растворимые при данном содержании их в сплаве, то ликвация проявляется лишь обогащением слоев отливки, примыкающих к свободной поверхности менее плотными компонентами сплава и примесями.

В результате ликвации при отливке массивных чугунных отливок в слоях ближе к свободной поверхности содержится больше углерода, фосфорной эвтектики, включений MnS; в стальных отливках повышается содержание P, C, S, концентрируются оксиды, нитриды, силикатные включения.

**Формы свободной поверхности** расплава в поле действия центробежных сил может быть определена исходя из того, что для свободной поверхности dP = 0.

При вращении формы вокруг вертикальной оси на каждую частицу расплава, кроме центробежного ускорения свободного падения. Тогда при dP = 0; Х = *mω2x*; Y = *-mg*; Z = 0, получаем Y = *ω2x2 / 2g*

Из этого следует, что свободная поверхность отливки при вертикальной оси вращения – параболоид вращения, геометрическая ось которого совпадает с осью вращения.

В случае этого отливки получаются разностенными в осевом направлении, что вынуждает назначать повышенные припуски на обработку резанием высоких отливок. Поэтому вращение вокруг вертикальной оси преимущественно изготовляют отливки небольшой протяженности в осевом направлении. Если при вращении формы с постоянной частотой вращения вокруг горизонтальной оси на расплав действует центробежная сила, то будем иметь *x2 + y2 = z2*, т. е. свободная поверхность расплава принимает форму круглого цилиндра, геометрическая ось которого совмещается с осью вращения формы. Однако на расплав действует так же и сила тяжести, поэтому в пути к нижней точке траектории его частицы движутся ускоренно, а к верхней – замедленно – происходит пульсация расплава. Вследствие неразрывности потока слой расплава в нижней части формы должен быть толще, чем в верхней.

Эксцентриситет, обуславливает пульсация расплава в форме, тем меньше, чем больше частота его вращения и чем больше вязкость расплава. По мере того как фронт затвердевания продвигается от стенок изложницы в глубь расплава, эксцентриситет уменьшается, достигая нуля в момент затвердевания свободной поверхности. Свободная поверхность получается цилиндрической и готовая отливка не имеет разностенности ни в радиальном, ни в осевом направлении.

Преимущества, недостатки и область применения центробежного литья

Рассмотренные особенности формирования отливки при центробежном литье указывает на следующие его **преимущества**: возможность улучшения заполняемости формы расплавом под действием давления, развиваемого центробежными силами, повышение плотности отливок вследствие уменьшения усадочных пор, раковин, газовых, шлаковых и неметаллических включений; уменьшения расхода металла и повышения выхода годно благодаря отсутствию литниковой системы при изготовлении отливок типа труб, колец, втулок или уменьшению массы литников при изготовлении фасонных отливок, исключения затрат на стержни при изготовлении отливок типа труб и втулок.

Особенности формирования отливки обуславливают и **недостатки** этого метода: трудность получения отливок из сплавов склонных к ликвации; загрязнение свободной поверхности отливок неметаллическими включениями и ликватами; неточность размеров полости отливок со свободной поверхностью; необходимость повышенных припусков на обработку свободных поверхностей отливок, вызванных скоплением неметаллических включений вблизи этих поверхностей и неточностью ее размеров.

Преимущества и недостатки способа, указанные выше, а также производственный опыт определяют рациональную область применения: наиболее рационально и экономически выгодно использование центробежного литья для получения отливок – полых цилиндров (труб, втулок, гильз, колец и т. д.). Основная эффективность достигается вследствие возможности получения таких отливок без стержней, без отходов на литники и прибыли; получение высокого качества отливок, не имеющих дефектов усадочного и газового происхождения.

Вместе с тем возможность создания избыточного давления на расплав способствует применению центробежного литья для улучшения заполняемости формы сложных тонкостенных отливок. Поэтому центробежное литье широко применяется для изготовления фасонных отливок сложной конфигурации из тугоплавких, легированных, труднообрабатываемых сплавов. В этих случаях применяются керамические и оболочковые формы, по выплавляемым моделям, кокили.

Формы для центробежного литья

Для изготовления отливок центробежным способом литья применяют различные литейные формы: металлические, песчаные, комбинированные, керамические, оболочковые по выплавляемым моделям.

Формы могут быть предназначены для изготовления отливок на машинах с горизонтальной и вертикальной осью вращения формы, для получения фасонных отливок. Конструкция формы зависит также от характера производства.

**Металлические** формы для изготовления отливок центробежным способом обычно называют **изложницами.**

Формы с горизонтальной осью вращения бывают короткие и длинные изложницы.

При применении песчано-глинистых форм для исключения пригара и разрушения форм частота вращения n определяется по формуле:



*P* – допустимое давление расплава на форму, Па;

*r* – радиус от оси вращения до рассматриваемой точки отливки, м;

*r0* – радиус свободной поверхности расплава, м;

По опытным данным, для сырых форм допустимое давление Р = 0,15-0,28 МПа; для чугуна и оловянных бронз: Р = 0,4 МПа; для сухих форм и Р = 0,36-0,6 МПа для форм и стержней.

При изготовлении отливок с вертикальной осью вращения можно определить необходимую частоту вращения по требуемой разностенности отливок по формуле:



*h* – высота отливки, м;

*K* – разность толщины стенки отливки в нижнем и верхнем сечении

*α μ x1* – радиус свободной поверхности отливки в ее верхнем сечении.

Получение биметаллических отливок

Биметаллические отливки можно изготовлять центробежным литьем армированием, наваркой расплава, последовательной заливкой различных сплавов.

Армирование отливок осуществляют заливкой жидкого металла отдельных металлических частей, выполненных из других материалов. Эти части (арматура) фиксируют в форме при ее сборке. При заливке арматура частично заливается расплавом и прочно скрепляется с основной массой отливки. (См. Рис. Схема получения армированного чугунного тормозного барабана). 1- форма; 2- футеровочная смесь; 3- стальной штамповочный диск; 4- пневмозажим; 5- кольцевой паз заполненный шамотом; 6-крышка.

Наварку жидкого металла на твердую металлическую основу производят путем заливки расплава внутрь заранее изготовленной и установленной изложницы втулки. При наварке связь заливаемого металла с втулкой осуществляется благодаря образованию химических связей или приваривания их друг к другу по всей поверхности соприкосновения.

Наваркой расплава на твердую металлическую основу изготавливают подшипниковые втулки, вкладыши, тормозные барабаны, при этом поверхность твердого металла должна быть тщательно подготовлена.

Последовательная заливка во вращающуюся форму двух металлов для изготовления биметаллических отливок заключается в следующем: сначала заливают один металл, образующих наружную поверхность. Второй из металлов, образующих внутреннюю поверхность, начинают заливать, когда заканчивается затвердевание наружного слоя и только на его поверхности остается немного жидкости. При этом на границе соприкосновения наружной и внутренней частей образуется слой промежуточного сплава толщиной в несколько мм, что обеспечивает прочное соединение частей отливки.

Литье под регулируемым давлением

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

Литье под регулированным давлением создает широкие возможности для управления заполнением формы расплавом.

К этим методам относятся: литье под низким давлением, литье вакуумным всасыванием и литье с противодавлением.

Очевидно пневматические и гидравлические процессы при заполнении формы рассмотренными способами имеют единую физическую природу.

При любом из этих способов, для подъема расплава из тигля установки до верхней точки полости формы на высоту Н необходимо приложить к расплаву давление:



*ΔH* – понижение уровня расплава в тигле;

*ΔPПОТ* – гидравлические потери в системе;

Скорость подъема расплава можно регулировать изменяя скорость нарастания давления *PЗАП*.

Скорость нарастания давления зависит от того, как быстро будет изменяться проходное сечение отверстия в регуляторе, через которое газ подается в камеру установки или отсасывается из нее, от давления, от соотношения геометрических размеров системы в целом.

Движение расплава в металлопроводе и полости формы – неустановившееся, характер его и скорость движения расплава зависит от скорости нарастания давления, геометрических характеристик системы, размеров тигля, площади его зеркала, диаметра и длины металлопровода, размеров полости формы и т. д; а также гидравлических сопротивлений его звеньев.

Таким образом, установки литья под регулируемым давлением, сложные динамические системы, позволяющие в широких пределах регулировать скорость заполнения формы расплавом.

Литье под регулированным давлением осуществляется на установках так, что процесс заполнения формы расплавом выполняется автоматически. Конструкции установок и машин для этих литейных процессов обеспечивают так же автоматизацию операции сборки и раскрытия форм, выталкивание отливок и ее удаление из формы. Таким образом, процесс литья под регулированным давлением позволяет повысит качество отливок и обеспечить автоматизацию их производства.

Литье под низким давлением

Машины, в которых металл движется под действием сжатого воздуха, называют компрессорными, или машинами литья под низким давлением (рис. 9). Принцип их работы заключается в том, что сжатый воздух давит на поверхность металла в тигле, из которого он поступает по металлопроводу в пресс-форму.

Компрессорные машины для литья под давлением с неподвижным металлопроводом имеют большую поверхность расплавленного металла, на которую давит сжатый воздух. Это приводит к окислению расплава и не позволяет поднять давление выше 60 Па (рис. 9, а, б).

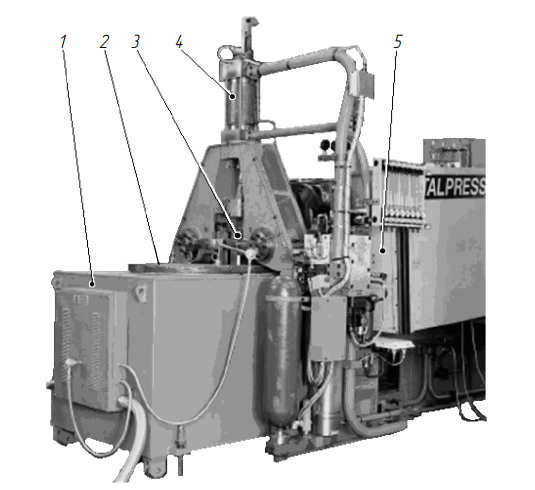


Рис. 8. **Машина с вертикальной горячей камерой прессования для литья под давлением IPZ 300**

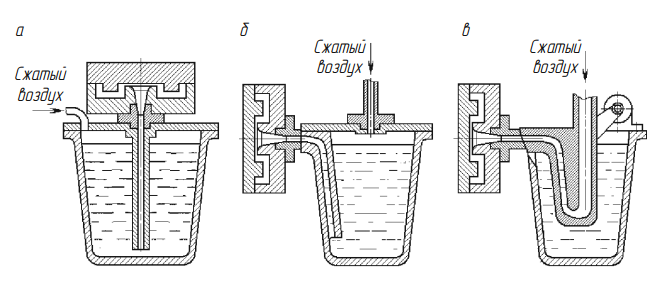


Рис. 9. **Схемы компрессорных машин литья под низким давлением**

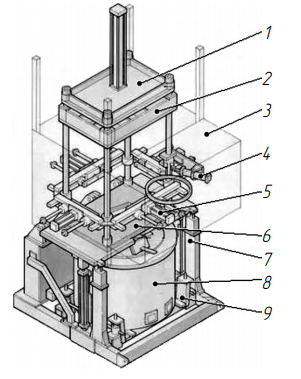


Рис. 10. **Устройство машины для литья под низким давлением модели ND14.10**

В отличие от них, в машинах с подвижным металлопроводом воздух давит на небольшую поверхность металла, что дает возможность повысить давление до 400 Па и резко уменьшить поверхность окисления жидкого металла (рис. 9, в).

Конструкция машины для литья под низким давлением модели ND14.10 фирмы Roperwerk (рис. 10) имеет устройство смыкания и размыкания полуформ с четырьмя направляющими колоннами для перемещения верхней подвижной плиты 1, верхнюю подвижную плиту для установки верхней полуформы 2, поворотный съемник отливок 4, цилиндры фиксации нижней полуформы 5, стол машины для установки нижней полуформы 6, основание машины 7, печь для плавки металла 8, систему подъема печи для точной стыковки металлопровода печи и формы 9. Рабочая зона закрывается защитным кожухом 3. Данная машина выполнена по схеме компрессорной машины.

Такие машины предназначены для изготовления алюминиевых заготовок с повышенными прочностными характеристиками в автоматическом режиме. Система управления выполнена на программируемом контроллере. Цикл работы машины литья под низким давлением включает:

* запирание кокиля;
* заполнение формы;
* охлаждение формы;
* размыкание половин формы и подачу поворотного съемника отливок;
* выталкивание отливки из кокиля

Машина имеет устройства терморегулирования печи и поддержания в ней необходимого давления Для точного дозирования металла в процессе литья используется многоэтапная система впрыска, которая зависит от конструкции отливки. Машины литья под низким давлением, работающие по схеме, показанной на рис. 9, а, из-за существенно сниженной газовой ликвации в отливке получили большое распространение.

**Достоинства процесса**: автоматизация трудоемких операций заливки формы; возможность регулирования скорости потока расплава в полости формы изменением давления в камере установки, что важно для заполнения форм тонкостенных отливок; улучшение питания отливок, что повышает их плотность благодаря избыточному давлению на расплав при его кристаллизации; снижение расхода металла на литниковую систему, т. к. не затвердевший расплав из металлопровода сливается в тигель (коэффициент годного составляет ок. 90 %).

**Недостатки:** невысокая стойкость части металлопровода, погруженной в расплав; сложность системы регулирования скорости потока расплава в форме, вызванная динамическими процессами, происходящими в установке, при заполнении ее камеры воздухом, нестабильностью утечки 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.

Литье под низким давлением широко применяется для изготовления сложных фасонных и особо тонкостенных отливок из алюминиевых и магниевых сплавов, простых отливок из медных сплавов и стали в серийном и массовом производстве.

Литье с противодавлением

Развитием способа литья под низким давлением является литье с противодавлением. При литье с противодавлением отливки изготавливаются путём принудительной заливки расплавленного металла в полость формы в результате воздействия на него избыточного давления порядка 0,1 МПа. По своей сути этот вид литья очень близок к литью под низким давлением и отличается от него тем, что к расплавленному металлу давление прикладывают не только со стороны заливки, но одновременно прикладывают и встречное избыточное давление меньшей величины, действующее на заливаемый металл с противоположной стороны.

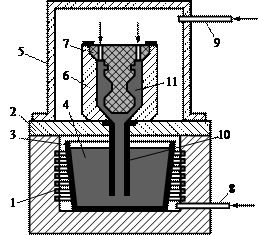


Рисунок - Изготовление отливки литьём с противодавлением: 1 – печь электросопротивления; 2 – герметизирующая крышка; 3 – тигель; 4 – расплавленный металл; 5 – герметичный кожух; 6 – литейная форма; 7 – песчаный стержень; 8 – нижняя нагнетающая труба; 9 – верхняя нагнетающая труба; 10 – металлопровод; 11 – отливка

Для такого литья используют специальные установки (рис), включающие печь электросопротивления 1, внутри которой с помощью крышки 2 образуется нижняя герметичная камера с установленным в ней тиглем 3 с расплавленным металлом 4. Сверху на крышке 2 установлен кожух 5, образующий верхнюю герметичную камеру, внутри которой помещается литейная форма 6, которая может включать закреплённый песчаный или оболочковый стержень 7, предназначенный для образования в отливке полости требуемой конфигурации. Сначала внутрь герметичных нижней и верхней камер по нагнетающим трубам 8 и 9 одновременно подают сжатый воздух или газ, создающий в них одинаковое давление 2 МПа, оказывающее на расплав уравновешивающее встречное воздействие. Затем в верхней камере немного сбрасывают давление до получения перепада в 0,1 МПа, под действием которого расплавленный металл 4 поступает в металлопровόд 10 и плавно заполняет полость формы 6. При этом металл находится под двусторонним избыточным давлением 1,9 МПа (этого давления нет при литье под низким давлением), которое способствует более надёжному заполнению достаточно узких каналов литейной формы. После затвердевания отливки под этим принудительным давлением оно сбрасывается из верхней и нижней камер, незатвердевший металл сливается из металлопровода 10 в тигель 3, после чего осуществляется извлечение отливки 10. Литьё с противодавлением обеспечивает надёжное плавное заполнение полости формы и направленное затвердевание отливки, что приводит к получению отливок с повышенной прочностью и герметичностью. Кроме того, сокращается расход металла на литниковую систему. При литье с противодавлением для изготовления отливок используются как металлические, так и разовые формы: песчаные, оболочковые, по выплавляемым моделям. Давление воздуха, под которым происходит заполнение формы расплавом, будет соответственно равно разнице давлений в нижней Pа и верхней Pб камерах установки: *ΔP = Pа – Pб* . Скорость подъема расплава в металлопроводе и полости формы так же как и при литье под давлением, будет зависеть от всей совокупности рассмотренных выше конструктивных и пневматических характеристик системы, определяющих скорость нарастания разницы давления *ΔP*, во время работы установки.

На производстве, наряду с конструкциями установок для литья с противодавлением используют установки с механическими перекрытиями металлопровода после заполнения формы затвором специальной конструкции (Рис. б). В установках этого типа после окончания закрытия и перекрытия металлопровода затвором давление в нижней камере понижается до атмосферного, а в верхней повышается до необходимого технологического; такие установки могут иметь менее прочную нижнюю камеру.

Литье с противодавлением позволяет уменьшить выделение газов из расплава, улучшить питание отливок и вследствие этого повысить их герметичность, 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.

Литье вакуумным всасыванием

Сущность 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 формы при заливке позволяет заполнять формы тонкостенных отливок с толщиной стенки 1-1.5 мм, исключить попадание воздуха в расплав, повысить точность, герметичность и механические свойства отливок.

Сущность технологического процесса заключается в следующем (рис. 7.42). Форму-кристаллизатор *2,* охлаждаемую водой, погружают на небольшую глубину в тигель *1* с жидким металлом. Засасывание происходит благодаря тому, что в кристаллизаторе вакуум-насосом через вакуум-баллон (на рисунке не показаны) создается разрежение. Под действием давления воздуха на зеркало расплава он постоянно питает усаживающуюся отливку, в результате чего она может быть получена плотной, без усадочных дефектов.

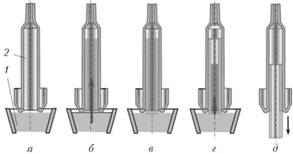


Рисунок - Принципиальная схема вакуумного всасывания:

*а –* погружение формы в расплав; *6* – всасывание расплава в форму; *в –* выдержка металла в форме; *г* – слив незатвердевшего металла; *д* – удаление отливки из формы

Наибольшая высота отливки, которую можно изготовить этим способом, зависит от плотности жидкого сплава и составляет около 1200–1400 мм для медных сплавов и около 4000 мм для алюминиевых.

Наиболее часто способ используют для литья заготовок втулок, вкладышей подшипников скольжения из дефицитных и дорогостоящих сплавов. При изготовлении втулок или труб после определенного времени, необходимого для затвердевания на стенке кристаллизатора сплава до определенной толщины, снимают разрежение и выливают не успевший затвердеть сплав в тигель. Затем поднимают кристаллизатор с затвердевшей в виде втулки частью сплава. Качество внешней поверхности такой отливки хорошее, внутренняя же поверхность имеет развитую волнистость, и се удаление возможно только механической обработкой. Для получения сплошной заготовки требуется более продолжительная выдержка. Форму можно заполнять расплавом с требуемой скоростью, плавно, без разбрызгивания, сплошным фронтом. Расплав, заполнивший форму, затвердевает в условиях вакуума; газы, содержащиеся в нем, могут выделяться, благодаря чему создаются условия для получения отливок без газовых раковин и пористости.

В рассматриваемом случае давление, под которым расплав заполняет полость формы, равно разнице давлений между атмосферным и остаточным в камере «б»: *ΔP = PАТМ – PОСТ* скорость заполнения формы расплавом зависит от скорости изменения разности давлений ΔP, которая зависит от сочетания многочисленных конструктивных и пневматических параметров системы.

Установки второго типа используют для отливки втулок, слитков и заготовок простой конфигурации в водоохлаждаемые кристаллизаторы. (Рис. Установка для литья вакуумным всасыванием втулок, гильз и слитков). Носок металлического водоохлаждаемого кристаллизатора 1 погружаем в расплав находящийся в тигле раздаточной печи 2. Рабочая полость кристаллизатора образующего отливку, соединяется вакуумпроводом с вакуумным ресивером 3. Разряжение создается насосом 6 натекателем 5. Рабочая камера соединена вакуумным ресивером через кран 4.

В полости кристаллизатора создается разряжение, и расплав всасывается в тигель кристаллизатора, поднимаясь на высоту, пропорциональную разряжению *hРТ* и обратно пропорциональную его плотности.

H = hРТ ⋅ ρРТ / ρ

*ρРТ* – плотность ртути

После затвердевания отливки носок кристаллизатора извлекается из ванны расплава, поворотом крана 4 рабочая полость соединяется с атмосферой и отливка выпадает из кристаллизатора.

**Достоинства:** форма может заполняться расплавом с требуемой скоростью, плавно, без разбрызгивания, сплошным потоком; 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; одновременно под действием давления воздуха на зеркало расплава последний постоянно питает усаживающуюся отливку, в результате чего отливка может быть получена плотной, без усадочных дефектов; сокращается расход прибылей; создаются условия для полной автоматизации процесса заполнения формы, что позволяет осуществить комплексную автоматизацию процесса получения отливок.

Установки первого типа используют обычно для изготовления тонкостенных фасонных отливок из алюминиевых и магниевых сплавов с толщиной стенок до 2-2,5 мм, а иногда и до 1-1,5 мм.

Установки второго типа – для изготовления отливок из легких цветных, медных сплавов, чугуна и стали, типа заготовок втулок, вкладышей, подшипников скольжения из дорогостоящих медных сплавов.

Непрерывное литье

**Технология непрерывного литья** в современном машиностроении используется достаточно широко и успешно, позволяя серьезно сокращать процесс изготовления заготовок при достаточно высоком уровне их качества. Состоит она в том, что из ковша в металлическую форму-кристаллизатор, охлаждаемую водой, непрерывно поступает расплав. По мере того как происходит затвердевание заготовки (она может иметь квадратное или [прямоугольное сечение](http://gk-drawing.ru/tables/symbols-technical-drawing/rolled-profiles-designation.php), форму трубы и т.п.) она извлекается или же специальными валками, или же другими устройствами. При необходимости эта отливка разрезается на части.

Благодаря тому, что расплав охлаждается с высокой интенсивностью, происходит его направленная кристаллизация. При этом уменьшается его неоднородность, количество газовых и неметаллических включений. Поскольку подача расплава происходит в кристаллизирующуюся отливку (точнее, в верхнюю ее часть) непрерывно, то так же происходит и питание фронта растущих кристаллов, что способствует устранению таких осадочных дефектов, как пористость, рыхлость и раковины. Можно резюмировать, что суть процесса непрерывного литья состоит в обеспечении возможности постоянного питания отливки и направленной кристаллизации.



В большинстве случаев метод непрерывного литья используется тогда, когда необходимо получить действительно высококачественные заготовки. Они имеют плотное строение без усадочных дефектов, весьма высокую точность размеров, чистую поверхность, малое содержание газов и приемлемую ликвидационную неоднородность. В то же самое время высокая скорость охлаждения расплава нередко приводит к тому, что в отливках образуются весьма значительные внутренние напряжения, а порой даже трещины.

Указанные выше особенности процедуры формирования отливки в существенной мере способствуют значительному повышению качества металлических заготовок. С точки зрения технической реализации, процесс производства по технологии непрерывной разливки стали имеет следующие важные преимущества:

• Данный метод значительно сокращает материальные затраты на изготовление литейных форм и изложниц;

• За счет сокращения расхода металла на донные части и прибыли слитков позволяет существенно увеличить выход готового продукта;

• Эта технология дает возможность получать отливки практически неограниченной длины и постоянного поперечного сечения;

• Технология непрерывного литья дает возможность получать отливки высокой точности, качества и с очень хорошей поверхностью;

• Технология непрерывного литья позволяет практически полностью автоматизировать процесс разливки расплава, дает возможность использовать для получения слитков непрерывно действующие машины. Получаемые профили можно или отправлять в прокатку и последующую обработку или сразу же использовать в качестве готовых деталей;

• Технология непрерывной разливки стали дает возможность практически полностью исключить такие трудоемкие операции, как изготовление литейных форм, выбивка, очистка отливок, обрубка;

• В технологии непрерывной разливки стали не используются стержневые и формовочные смеси, что положительно влияет на состояние окружающей среды и условия труда литейщиков.

Таким образом, можно констатировать, что непрерывное литье представляет собой действительно прогрессивную технологию.

**Достоинства:** возможность получения отливки постоянного поперечного сечения, неограниченной длины; увеличение выхода годного путем уменьшения расходов металла на прибыли и донные части слитков; уменьшение расходов на изготовление изложниц и литейных форм; повышение качества металла, точность и улучшение поверхности отливки; автоматизация процесса разливки расплава; полное исключение трудоемких операций изготовления литейных форм, выбивки, обрубки, очистки отливок; устранение из литейного цеха формовочных и стержневых смесей и связанное с этим существенное улучшение условий труда и окружающей среды.

Однако – непрерывное литье не позволит получить отливки сложной конфигурации.

Для повышения интенсивности охлаждения отливки процесс осуществляют так, что в коротком кристаллизаторе 1 (Рис. Схема литья алюминиевых слитков) формируется только корочка, толщиной достаточной для того, чтобы при ее извлечении из кристаллизатора не образовался обрыв или трещина, а основное количество теплоты отводят погружением отливки в воду 2 в зоне вторичного охлаждения. Такую схему процесса используют для литья алюминиевых сплавов различных размеров, круглых, квадратных, прямоугольных, поперечных сечений для последующей прокатки или других способов обработки давлением.

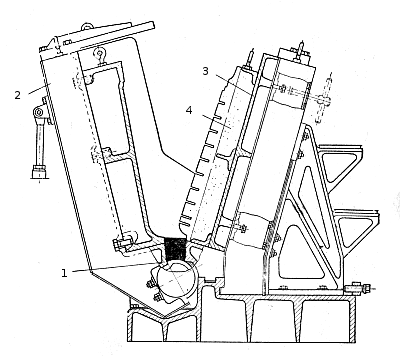
Непрерывным литьем получают трубы и втулки из чугуна. При получении литых труб в кристаллизатор устанавливают водоохлаждаемый стержень (с конусностью 0,4 %), выполняют отверстие в трубе. Перед началом заливки стол, на котором располагается стержень с кольцевым пазом для захвата трубы, поднят. Жидкий чугун из ковша по литниковой системе подается в кристаллизатор. Через питатели в дне чаши расплав подается между стенкой кристаллизатора и водоохлаждаемым металлическим стержнем. Когда уровень расплава в кристаллизаторе поднимается на столько, что до верхнего его края остается 25-30 мм начинается вытягивание трубы, при этом расплав продолжает непрерывно поступать в кристаллизатор. Стол машины перемещается между колоннами с помощью цепей. По окончанию литья труба специальным устройством снимается со стола машины, стол возвращается в исходное положение и цикл повторяется. Трубы полученные таким способом, имеют хорошую внутреннюю и наружную поверхность, мелкозернистую структуру, высокую плотность. Полунепрерывным способом можно изготовлять трубы диаметром до 1000 мм с толщиной стенок до 50 мм и длиной до 10 м.

Скорость вытягивания трубы внутренним диаметром 300 мм и длиной 10 м из кристаллизатора высотой 0,5 м составляет около 2,4 м/мин.

Литье выжиманием

Сущность этого способа заключается в том, что для улучшения заполнения формы и повышения качества отливки процесс осуществляют так, чтобы геометрические размеры полости формы изменились по мере заполнения расплавом и затвердевания отливок. Это позволит уменьшить потери теплоты в расплаве и заполнить формы тонкостенных крупногабаритных отливок, а так же осуществить компенсацию усадки отливки путем уменьшения ее объема при кристаллизации.

В **металлоприемник** 1 (**рис.**) литейной выжимной установки заливают расплавленный **металл**. Подвижная матрица 2 перемещается в сторону неподвижной матрицы 3 с постоянной угловой скоростью. При сближении матриц металл выжимается из металлоприемника и заполняет полость формы между матрицами. Этим способом можно получать **отливки** с **песчаным** **стержнем** 4 и получать крупногабаритные тонкостенные отливки.



***Рисунок****. Схема установки для литья выжиманием.*

Основными технологическими параметрами процесса являются скорость передвижения подвижной полуформы и закон скорости подъема уровня расплава в установке, температура заливки расплава в металлоприемник, начала выжимания, нагрев металлоприемника и металлической формы, а также толщины и свойства теплоизоляционного покрытия на поверхностях металлических полуформ.

Температуру заливки алюминиевых и магниевых сплавов в металлоприемник принимают в пределах 350-370 0С, а начало выжимания 290-310 0С; для широкоинтервальных расплавов процесс выжимания начинается при температуре ликвации данного сплава.

Температура нагрева металлоприемника и металлической полуформы составляет обычно 200-320 0С.

Закон скорости подъема расплава в установке принимают таким, чтобы, подойдя к рабочей полости формы, расплав приобрел оптимальную скорость течения 0,5-0,7 м/с. Рабочая полость формы должна заполняться с оптимальной постоянной скоростью.

Отливки, полученные литьем выжиманием, имеют хорошую структуру и механические свойства благодаря тому, что формирование отливки происходит одновременно с заполнением литейной формы и заканчивается в основном в момент окончания ее заполнения. Это обеспечивает питание отливки.

Кристаллизация под давлением и штамповка из расплава

Это процессы позволяют в значительной мере компенсировать усадку расплава при кристаллизации благодаря уменьшению объема полости формы. Расплав заливают в неразъемную металлическую форму, достаточно прочную, чтобы выдержать давления, передаваемые на отливку поршнем При приложении высоких давлений (до 30 МПа и более) и перемещении поршня вследствие пластических деформаций кристаллизирующейся корочки происходит уменьшение объема полости формы. В результате расплав поступает в образующиеся усадочные поры, рыхлости и питает кристаллизирующуюся отливку. Высокие скорости кристаллизации расплава в металлической форме благодаря отсутствию зазора между стенками отливки и формой способствуют измельчению структуры. Все это позволяет повысить прочность в 2-4 раза, чем отливки в песчаные формы, повысить пластичность и ударную вязкость. Отливки, полученные кристаллизацией под давлением поршня, обладают механическими свойствами одинаковыми с поковками.

Кристаллизацию под давлением поршня применяют для изготовления слитков, фасонных отливок с толщиной стенок до 8 мм из медных, алюминиевых, цинковых сплавов, чугуна, стали.

Штамповка из расплава совмещает заполнение формы выжиманием и кристаллизацию под давлением. Этот метод используют для получения отливок с открытой полостью или отверстием и сложными наружными очертаниями.

Формы для кристаллизации под давлением и штамповка из расплава должны быть прочными. Детали форм соприкасаются с расплавом; изготавливают из стали 3Х2В8; 4ХВ8; Х12М и подвергают термообработке.

Параметры технологического режима

* Температура матрицы и пуансона 180-250 0С, но не выше 400 0С
* Температура заливки на 170 0С ниже температуры ликвидуса сплава
* Скорость опускания пуансона – не более 0,5 м/с

Процесс штамповки из расплава и кристаллизации под давлением обычно осуществляют на гидравлических прессах.

Электрошлаковое литье

Электрошлаковое литье (ЭШЛ) – это способ получения фасонных отливок в водоохлаждаемой металлической литейной форме – кристаллизаторе, основанный на применении электрошлакового переплава (ЭШП) расходуемого электрода.

Производство отливок включает ряд последовательных процессов: плавка металла, транспортировка к форме, ее заполнение и кристаллизация. В течение всего производственного цикла в жидком металле интенсивно протекают окислительные процессы газонасыщения, а также взаимодействия с материалами формы. Это неизбежно приводит к ухудшению качества отливок.

Сущность электрошлакового литья заключается в том, что плавка, транспортировка металла и заполнение формы происходят одновременно, непосредственно в самой форме при полной изоляции от атмосферного воздействия. Это позволяет, с одной стороны, сократить время производственного цикла, а с другой – обеспечить химическую чистоту расплава.

Различают следующие способы электрошлакового литья: с прямым выплавлением металла в форму; с переливом металла и с приплавлением закладных элементов отливки.

Способ литья с прямым выплавлением металла заключается в следующем (рис. 1). Жидкий металл, предназначенный для заполнения формы, получают путем переплава электрода из металла, требуемого химического состава. Источником нагрева электрода является шлаковая ванна. В начале процесса в водоохлаждаемый медный кристаллизатор 6 заливают предварительно расплавленный шлак специального состава. Электрический ток подводится к переплавляемым электродам 7 с затравки 1 в нижней части кристаллизатора 6. Шлаковая ванна обладает высоким электросопротивлением. При прохождении через нее электрического тока ванна нагревается до температуры 2000 °К и более. При погружении в ванну концы электродов оплавляются. Капли расплавленного металла проходят через ванну шлака 4, собираются в зоне кристаллизации, образуя под слоем шлака металлическую ванну 3. Металлическая ванна непрерывно пополняется в верхней части

расплавом от плавящихся электродов и последовательно затвердевает в нижней части вследствие отвода теплоты через стенки кристаллизатора. Для получения отливки 2 электроды 7 по мере их оплавления и затвердевания отливки постепенно поднимаются вверх. Для образования полости в отливке водоохлаждаемый металлический стержень 5 также перемещается вверх.

Таким образом, формообразование отливки осуществляется в результате направленной кристаллизации металла – снизу вверх, а литейная форма выполняет две функции: служит устройством для приготовления расплава и непосредственно для формирования отливки.

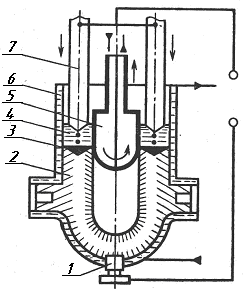


Рисунок — **Схема электрошлакового литья с прямым выплавлением металла в форму**: *1 – затравка; 2 – отливка; 3 – металлическая ванна; 4 – шлак; 5 – металлический стержень; 6 – кристаллизатор; 7 – электроды*

Способ электрошлакового литья с переливом металла (рис. 2 *а*) предполагает разделение процессов плавки электродов и кристаллизации жидкого металла, которые осуществляются порознь в плавильной печи и литейной форме. Жидкий металл из плавильной печи поступает в форму путем перелива. Плавильная печь перемещается вверх относительно неподвижной формы по мере ее заполнения. Металл в плавильной печи и форме постоянно находится под слоем жидкого флюса.

**Способ электрошлакового литья с приплавлением**(рис. 2 *б*) применяется для изготовления отливок сложной конфигурации. В этом случае заранее изготовленные закладные элементы устанавливают в знаковые части литейной формы. При плавке металла в форме по определенному режиму происходит соединение закладных элементов с кристаллизующимся в форме жидким металлом. Способ позволяет получать не только сложные по конфигурации отливки, но и комбинированные по составу.

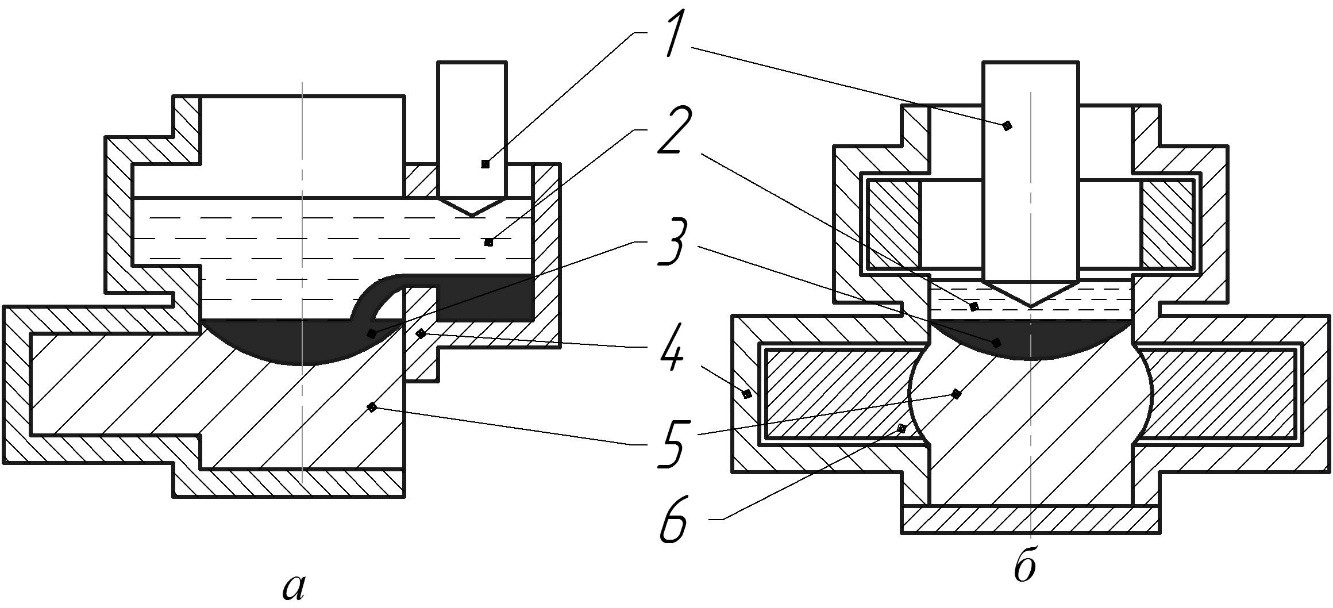


Рисунок — **Схемы электрошлакового литья с переливом металла (а) и приплавлением (б)**: *1 – расходуемый электрод; 2 – жидкий шлак; 3 – жидкий металл; 4 – форма; 5 – отливка; 6 – закладной элемент*

Электрический ток подводится к переплавляемым электродам и затравке в нижней части кристаллизатор . Шлаковая ванна обладает малой электропроводностью, поэтому при прохождении через нее тока выделяется большое количество тепла Дж:



*I* – сила тока;

*RШ* – электрическое сопротивление шлаковой ванны;

*t* – время процесса.

Качество отливок при ЭШП обусловлено особенностями формирования отливки. Перенос капель расплава с конца электрода через шлаковую ванну, интенсивное взаимодействие расплава со шлаком, последовательная и направленная кристаллизация расплава при высокой интенсивности охлаждения способствует удалению из расплава неметаллических включений и растворимых газов, получению плотного однородного кристаллического строения отливки.

Химический состав металла в отливке по основным элементам практически не изменяются, но содержание кислорода и азота снижается в 1.5-2.0 раза, понижается концентрация серы и уменьшается в 2-3 раза загрязненность расплава неметаллическими включениями. Все это способствует повышению свойств металла. Поэтому механические свойства отливки ЗШП выше, чем у поковок и проката из металла одинакового химического состава.

Накопленный производственный опыт показывает, что наиболее выгодно использовать этот процесс для получения отливок из специальных сталей и сплавов и отливок специального назначения, к которым предъявляются повышенные требования по качеству металла, механическим свойствам. К ним относятся корпусы задвижек запорной и регулировочной аппаратуры тепловых и электростанций, коленчатые валы, шатуны крупных судовых двигателей и др.

Для ЭШЛ используют различные флюсы, как правило, фтористокислые смеси. Например флюс АНФ-1П содержит 100 % CaF2; или флюс АНФ-6, состоящий из 70 % CaF2 и 30 % Al2O3. Перед началом процесса флюс предварительно расплавляют в графитовом тигле графитовым электродом, а затем в жидком виде заливают в кристаллизатор.