14.2. Литье с применением внешних воздействий на жидкий и кристаллизующийся металл

14.2.1. Литье под давлением

Данный способ представляет собой машинное литье металла в металлические формы под избыточным давлением (до 300 МПа). Сущность процесса заключается в том, что в камере прессования, соединенной с оформляющей полостью формы, на расплав давит поршень, в результате чего жидкий металл устремляется в полость формы и быстро заполняет ее; застывая в ней, он образует отливку с высокой точностью размеров. Затем происходит раскрытие пресс-формы и удаление отливки с помощью толкателей (рис. 14.4). Технологический процесс литья под давлением характеризуется коротким циклом и малым числом операций. Машины для литья под давлением подразделяются по конструкционным и функциональным! особенностям узла прессования на три; типа: с холодной (неподогреваемой) горизонтальной (рис. 14.4, *а*), с холодной вертикальной (рис. 14.4, *б*) и с горячей вертикальной (рис. 14.4, *в*) камерами прессования.

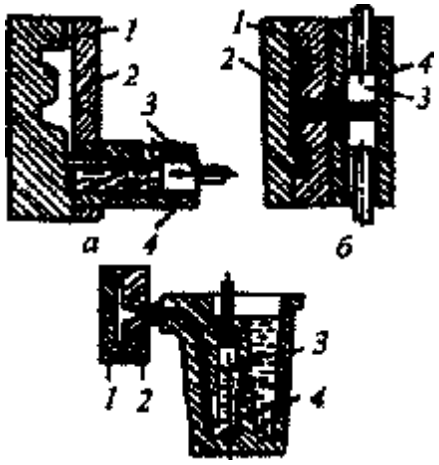

Рис.14.4. Литье под давлением:1 — неподвижная часть пресс-формы; 2— подвижная часть пресс-формы; 3 — поршень; 4 — металлоприемник

Горячая камера прессования располагается в обогреваемом чугунном тигле с расплавленным металлом. В машинах с горячей камерой прессования предусмотрены автоматические операции дозирования и заливки, что существенно повышает их производительность до 1000—3600 запрессовок в час. Машины с горячей камерой прессования благодаря медленному охлаждению расплава позволяют получать отливки малых, размеров и незначительной массы (до нескольких граммов) и используются в основном для литья легкоплавких (цинковых, свинцово-сурьмянистых и др.) сплавов. Машины же с холодной
камерой прессования используются для получения отливок из цветных сплавов на основе алюминия, магния, меди, а также из стали и чугуна. С учетом высокой скорости охлаждения сплавы должны обладать оптимальным комплексом технологических свойств: хорошей жидкотекучестью, малой усадкой и минимальным взаимодействием с материалом формы.

Физико-химические процессы, протекающие при литье под давлением. Литьем под давлением получают тонкостенные отливки, масса и теплосодержание которых существенно (на два порядка) меньше, чем у металлических форм. Поэтому при заливке металла в пресс-форму охлаждение отливки происходит с высокой скоростью. Это вызывает необходимость очень быстрого (со скоростью до 120 м/с и продолжительностью от 0,01 до 0,6 с) заполнения расплавом формы. Впускной поток расплава, ударяясь о стенку формы, оказывает на нее гидродинамическое давление. Рост гидродинамического давления способствует повышению качества поверхности отливки и обеспечивает формирование ее рельефа. Однако при этом (из-за увеличения скорости впускной струи) возрастает эрозионное воздействие потока, для уменьшения которого угол между стенкой формы и направлением движения потока следует брать по возможности минимальным. Например, при литье сплава ЦАМ 4 со скоростью впускной струи 40 м/с давление потока расплава на стенку формы под углом 90° будет составлять 11 МПа, а под оптимальным углом 45° — в три раза меньше — 3,5 МПа.

При большой скорости впуска расплава (40—120 м/с), существенно превышающей ее критические значения (от 0,5 до 12 м/с), турбулентный поток металла, ударяясь о стенку формы, разбивается на отдельные капли. При этом происходит закупорка вентиляционных каналов мелкодисперсными каплями металла. Вихревой поток расплава захватывает оставшиеся в полости формы газы (компоненты воздуха) и пары смазывающего материала (70—90% газопаровой фазы от исходного ее количества), образуя при этом газометаллическую эмульсию, быстро затвердевающую в форме. Затвердевший металл имеет по всему объему газовую пористость, что существенно снижает его механические свойства (особенно пластичность). Оставшийся в порах газ при нагреве расширяется, что приводит к вспучиванию металла. Вследствие этого отливки, полученные литьем под давлением, нельзя подвергать термической обработке.

Так называемый гидравлический удар, возникающий при Остановке расплава в результате окончания заполнения им полости формы, проявляется в виде мгновенного кратковременного повышения давления металла на стенки формы (например, при скорости потока 20 м/с повышение давления для цветных сплавов составляет от 0,7 до 3 МПа). При гидравлическом ударе металл прижимается к рабочей поверхности формы и четко воспроизводит ее конфигурацию в отливке. Это обеспечивает повышенную плотность ее поверхностного слоя (толщиной до 0,2 мм), отсутствие в нем газовой пористости, точность размеров и хорошее качество поверхности отливки. Под действием гидравлического удара между полуформами образуется небольшой зазор, вызванный смещением подвижной части пресс-формы в направлении, перпендикулярном плоскости разъема. Образование зазора может вызвать разбрызгивание металла и возникновение заливов на отливках, которые устраняют дополнительной механической обработкой. Возникновение указанных дефектов предотвращают с помощью запирающих устройств, характеризующихся величиной усилия запирания (от 2 до 30 МН — в зависимости от типа машины).

Для уменьшения возможности образования газовой и усадочной пористости в отливках применяют:

а) вакуумирование расплава и полости формы;

б) заполнение полости формы (перед заливкой алюминиевых сплавов) кислородом, полностью расходуемым на окисление расплава с образованием незначительной объемной доли оксидов металла. При этом в виду отсутствия в литейной форме воздуха исключается возможность взаимодействия расплава с азотом воздуха (источником образования газовой пористости). Этот метод реализуется при использовании негазотворных смазывающих материалов;

в) толстостенные питатели (вместо тонких — щелевых), затвердевающие позже отливки и обеспечивающие ее полноценное заполнение под давлением.

Преимуществами способа литья под давлением являются его высокая производительность, точность размеров и хорошее качество поверхности (гладкая, плотная) отливок, автоматизация процессов литья, снижение в 10 раз и более трудоемкости изготовления отливок по сравнению с литьем в песчаные формы.

Недостатки способа литья, в первую очередь, обусловлены возникновением в отливках газоусадочной пористости: это пониженные плотность и пластичность металла, невозможность проведения следующей за термической обработки. К недостаткам данного способа литья можно также ограничение массы отливок (до 50 кг), высокую стоимость пресс-форм.

Литьем под давлением получают детали (корпуса, платы) различных приборов, электрических машин, карбюраторов, а также алюминиевые блоки цилиндров, сантехническую арматуру и др. Данным способом изготавливают изделия, почти не требующие последующей механической обработки, в числе детали с готовой резьбой и т. п.

14.2.2. Литье под низким давлением

Литье под низким давлением (ЛНД) представляет собой процесс получения отливок при заполнении форм расплавом и его кристаллизации из-быточным давлением до 0,1 МПа. Данный способ литья используют для изготовления деталей из алюминиевых, магниевых и медных сплавов, реже — из стали и чугуна. В форму металл поступает из тигля через металлопровод, частично погруженный в расплав, под давлением воздуха или газа на зеркало ванны расплава (рис. 14.5).

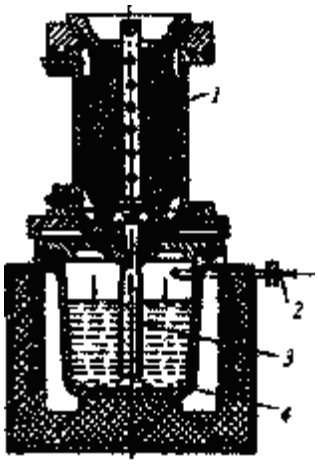

Рис. 14.5. Установка для литья под низким давлением: *1*— форма; *2* — газопровод; *3* — металлопровод; *4*- тигель

Когда отливка затвердевает производят разгерметизацию установки и слив излишков металла из металлопровода в тигель. При ЛНД тигель с расплавом размещается в теплоизолированной камере литейной установки. Это обеспечивает хорошие условия для длительного термостатирования жидкого металла. Погружение металлопровода в тигель с расплавом на определенную глубину (расстояние
между нижним концом металлопровода и дном тигля составляет обычно 30—50 мм)

исключает возможность захвата шлака и флюса в нем с поверхности жидкого металла.

Особенности технологического процесса литья под низким давлением. При литье под низким давлением (ЛНД) в процессе всего рабочего цикла получения отливки литейная форма, металлопровод и тигель объединены расплавом в единую систему (гидравлическую, тепловую, концентрационную). Наличие единой гидродинамической системы позволяет управлять параметрами процесса заполнения формы расплавом (посредством программированного изменения перепада давлений над зеркалом ванны и в форме) о целью достижения оптимального по качеству варианта. Этим важным преимуществом литье под низким давлением в первую очередь отличается от многих известных способов литья, основанных на дозированной заливке расплава в форму или промежуточное устройство.

Плавное регулируемое заполнение формы жидким металлом позволяет практически полностью вытеснить из нее и литниковой системы газы, устраняя тем самым возможность возникновения газовой пористости отливок. Принудительное же подпитывание кристаллизующейся отливки расплавом (за счет его избыточного давления) повышает ее плотность и препятствует образованию в ней усадочной и газовой пористости. Поскольку через верхнюю зону формы проходит меньше металла, чем через нижнюю, то и температура в первой зоне ниже, чем во второй. С учетом вышеизложенного можно создать последовательное затвердевание отливок, обеспечивающее получение деталей с качественной плотной структурой и повышенной герметичностью. Из тех же соображений массивные части будущей отливки располагают внизу формы, поскольку им требуется дополнительное питание при затвердевании. Эти части формы соединяют литниками с металлопроводом.

Формирование плотной (беспористой) мелкозернистой структуры металла обеспечивает существенный рост его механических и эксплуатационных (износостойкость, коррозионная стойкость, циклическая прочность) характеристик. Так, например, прочность литого сплава возрастает (по сравнению со свойствами отливок, полученных кокильным литьем) на 15—25%, а пластичность — на 50% и более.

Заполнение формы жидким металлом непосредственно из тигля с повторным использованием сливаемых после предыдущей плавки остатков расплава существенно (от 3 до 10 раз по сравнению с литьем в кокиль) сокращает расход металла.

При литье под низким давлением используют металлические (кокиля), оболочковые, песчаные, керамические и гипсовые формы. Кокили изготавливают из стали или чугуна, а металлопровод — из жаростойкого чугуна и титанового сплава ВТ-14. Как и при литье в кокиль, применяются теплоизоляционные покрытия. В качестве смазки для трущихся частей кокилей и по-
верхностей металлических стержней, извлекаемых из отливки, используется коллоидный графит марки В-1.

Преимуществами способа литья под низким давлением являются: автоматизация заливки формы; пониженный расход металла; возможность регулирования скорости потока металла (с

целью обеспечения оптимального процесса заполнения металлом формы); повышенные плотность и качество структуры металла (благодаря избыточному давлению на него, обеспечению последовательного затвердевания отливок, а также исключению газовой пористости); возможность получения тонкостенных (с толщиной стенок 1,5-2 мм) отливок; высокий уровень механических и эксплуатационных свойств отливок.

Недостатком способа ЛНД является его ограниченное применение при литье деталей из чугуна и стали, что вызвано в данном случае малым ресурсом работы металлопровода.

Преимущества процесса литья под низким давлением были широко использованы при разработке новых способов литья, совмещающих рассматриваемый способ заполнения форм металлом с последующими технологическими Процессами литья: намораживанием, выжиманием, литьем под давлением и др.

14.2.3. Литье вакуумным всасыванием

Литье (заливка) вакуумным всасыванием заключается в заполнении формы металлом создаваемого в ней вакуума. При данном способе литья полость формы заполняется за счет перепада давлений от атмосферного (над зеркалом расплава) до пониженного —10—8О кПа (в полости формы).

На практике реализуются две основные схемы процесса литья вакуумным всасыванием (ЛВВ):

а) размещение литейной формы в герметичной камере и соединение ее с металлопроводом, погруженным в тигель с расплавом. В данном случае можно использовать формы, полученные любыми известными способами: металлические, песчаные, керамические оболочковые, гипсовые, графитовые и др.;

б)герметизация полости формы, сообщающейся посредством металлопровода с расплавом. Эта схема широко используется при литье в водоохлаждаемую металлическую форму кристаллизатор.При этом получают какполые, так и сплошные заготовки и слитки. При наличии герметичного кожуха могут быть использованы и перечисленные в пункте «а» формы.

На рис. 14.6 рассматривается пример реализации варианта «б».

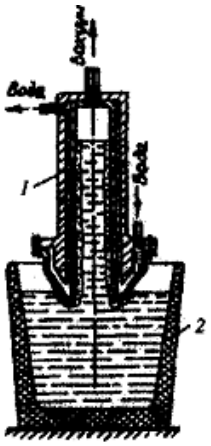

Рис. 14.6. Установка для литья вакуумным всасыванием: *1* — кристаллизатор; *2*— раздаточная печь

Охлаждаемая водой металлическая форма (кристаллизатор) погружается своим «носиком» (металлопроводом) в расплав, находящийся в тигле раздаточной печи. В полости формы, соединенной с вакуумным насосом, создается раз режение. Расплав всасывается в полость формы с последующей его кристаллизацией. После затвердевания отливки форму поднимают для извлечения из расплава «носика» кристаллизатора. Рабочую полость формы соединяют с атмосферой, открыв специальный кран. В результате пуска атмосферного воздуха в полость кристаллизатора отливка выпадает из него в приемный короб. Таким способом часто получают втулки, вкладыши, подшипники скольжения из цветных сплавов (латуней, бронз), чугуна и стали.

Высокая заполняемость форм расплавом при ЛВВ позволяет получать тонкостенные отливки толщиной 1 мм и менее. В связи с вакуумированием форм фактор их газопроницаемости теряет

актуальность: можно использовать формы, обеспечивающие высокое качество поверхности отливки, вне зависимости от их газопроницаемости.

При литье в среде низкого вакуума существенно уменьшается газонасыщение и окисление заполняющего форму расплава. Литье вакуумным всасыванием способствует формированию мелкозернистой структуры, также повышению герметичности и комплекса механических свойств отливок, особенно тонкостенных (с толщиной стенки до 0,5 мм). Например,при литье с разрежением до 60 кПа
алюминиевых сплавов АЛ4 и АЛ9 их предел прочности повышается на 20—70%, а относительное удлинение
— на 100% и более. Опыт показал, что использование литья вакуумным всасыванием взамен кокильного приводит к существенному повышению качества поверхности тонкостенных отливок (крышек, крыльчаток), снижению расхода металла на литниковую систему и росту (в 1,2 раза) производительности труда за счет сокращения продолжительности технологического цикла литья. Производительность машин ЛВВ зависит от числа кристаллизаторов: на машинах с одним кристаллизатором она составляет 100-120 отливок в час, а со сдвоенным кристаллизатором — 170 — 180.

Преимущества способа заливки вакуумным всасыванием: высокая плотность отливок; отсутствие газовых и усадочных пор, а также литниковой системы и прибылей; хорошее качество поверхности; повышенные механические свойства отливок; достаточная производительность.

Недостатки ЛВВ (в случае использования форм-кристаллизаторов): применимость его для получения отливок лишь простой формы; волнистость внутренних поверхностей отливок (например, втулок) и, как следствие, необходимость обеспечения припусков на механическую обработку.

14.2.4. Литье с кристаллизацией под давлением

Данный способ обеспечивает получение плотных заготовок с высоким уровнем физико-механических и эксплуатационных свойств и с небольшими припусками на механическую обработку.

Сущность способа литья с кристаллизацией под давлением (ЛКД) заключается в заливке металла в пресс-форму а последующем его уплотнении пуансоном гидравлического пресса в процессе затвердевания расплава (рис. 14.7).

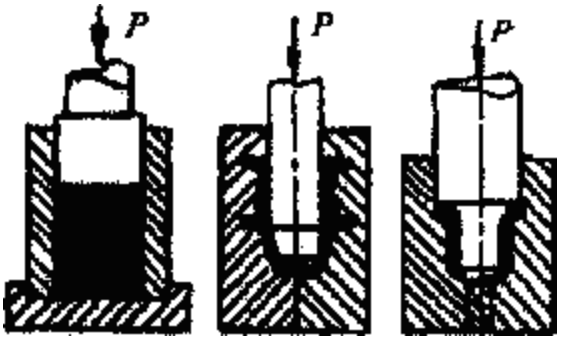

Рис. 14.7. Штамповка жидких сплавов в разъемных (а, б) и неразъемных (в)

Пресс-форму заполняют расплавом (посредством свободной заливки) до определенного уровня, а затем его выжимают в полость формы пуансоном со скоростью 0,1—0,5 м/с. Заливку осуществляют при температуре, превышающей ликвидус сплава на 20—100 °С. С помощью пуансона окончательно оформляются контуры отливки и производится ее уплотнение (выдержка под давлением) до полного затвердевания. Отливку, извлеченную из пресс-формы, подвергают (по необходимости) термической и механической обработкам. В процессе ЛКД кристаллизующийся металл может дополнительно подвергаться воздействию вибрации и ультразвука.

При литье сплава с кристаллизацией под давлением за счет пластический деформации происходит «залечивание» межкристаллических и сжатие газовоздушных пор, что обеспечивает получение более плотной отливки. Высокие скорости кристаллизации и механическое воздействие обеспечивают формирование мелкокристаллической структуры и устранение газоусадочной пористости. Снижение степени развития ликвационных процессов способствует более равномерному распределению неметаллических включений, Все это приводит к повышению плотности и комплекса механических свойств металла отливок: увеличению прочности (в 1,5 раза),

пластичности и ударной вязкости (в 2—4 раза); по свойствам такие отливки приближаются к поковкам.

Классификация процессов формирования отливки при ЛКД. В процессе литья с кристаллизацией под давлением реализуются следующие основные схемы деформирования (рис. 14.8).

Поршневое прессование (рис. 14.8, *а*).

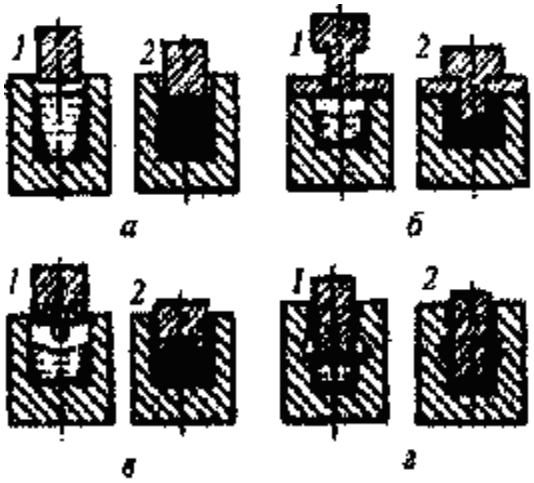

Рис. 14.8. Схемы прессования при литье кристаллизацией под давлением: а — поршневое прессование; б — пуансонное прессование; в- пуансонно – поршневое прессование; г — прессование через литники-питатели;1- исходное положение пуансона ; 2- конечное положение пуансона

При прессовании под поршневым давлением пуансон перекрывает всю открытую полость матрицы и действует на формирующуюся отливку в течение всего периода ее затвер девания. В данном случае отливка приобретает свою конфигурацию уже в процессе свободной заливки расплава в форму.

Пуансонное прессование (рис. 14.8, б). Здесь частичное формообразование отливки происходит еще до контакта с пуансоном при заливке расплава и выдержке его в пресс-форме. Затем выступающая (рабочая) часть пуансона,

имеющая меньшую площадь торца по расплава, внедряется В кристаллизующийся расплав, вытесняет его, образуя в отливке внутреннюю полость. При этом общий. уровень расплава в форме повышается по сравнению с первоначальным уровнем заливки за счет массы вытесненного пуансоном металла.

Пуансонно-поршневое прессование (рис. 14.8, *в*). Этот процесс включает элементы поршневого и пуансонного прессования, Отличительной особенностью давней схемы является то, что в процессе окончательного формирования конфигурации отливки вытесняемый пуансоном расплав заполняет его собственные рабочие полости.

Прессование через питатели (рис.14.8,*г*). В данном случае расплав заливают в металлоприемник, из которого он выдавдавливается пуансоном (через шпатели) в закрытые полости пресс-формы. Таким способом можно в одной пресс-форме получать несколько отливок.

Выбор технологических параметров процесса. К главным технологическим Параметрам процесса ЛКД относятся следующие:

а) Давление прессования Рн. Давление обеспечивает формообразование отливки, измельчение зерен и устранение структурных дефекте» (газовых и усадочных пор; раковин), повышение качества поверхности, плотности материала и других физикомеханических свойств.

С увеличением прочности сплава (особенно при повышенных температурах) должно возрастать и давление прессования. Экспериментально установлена зависимость между пределом прочности материала при комнатной температуре σ_B и величиной минимального давления прессования $P_н$. Так, например, для сплавов с пределом прочности σ_B до 250 МПа минимальное давление прессования $P_н$= 100—150 МПа, а при σ_B > 550 МПа $P_н$=200—250 МПа.

б) Температура заливаемого расплава ($T_{зал}$) превышает температуру плавления (или ликвидуса) сплава на 20—100 °С.

в) Начальная температура пресс-формы $T_{пф}$ = 150—250 °С.

г)Время выдержки расплава в пресс-форме до приложения давления ($t_д$) должно быть минимальным, поскольку увеличение продолжительности выдержки приводит к образованию твердой массивной труднодеформируемой корки металла. Для тонкостенных отливок $t_д < 5$с.

д) Время выдержки расплава в пресс-форме под давлением $t_п$. При получении фасонных отливок время выдержки под давлением (в секундах) рассчитывается с учетом толщины стенки δ (в мм): $t_п = (0,8—1,2)\delta$.

е)Скорость формообразования $\upsilon_ф$. В процессе литья с кристаллизацией под давлением пресс-формы охлаждают водой или воздухом. Значение скорости формообразования зависит от массы и толщины стенок отливок и имеет определенные ограничения. Например, скорость формообразования $\upsilon_ф$ не должна превышать 0,10 м/с для массивных отливок и 0,15 м/с для тонкостенных. Это связано с опасностью возникновения внутренних напряжений в отливке из-за неравномерного охлаждения ее отдельных участков.

Материалы отливок. Способом литья с кристаллизацией под давлением получают простые и сложные по конфигурации заготовки из сплавов на основе цветных металлов (алюминия, магния, меди, цинка), а также стали и чугуна. При этом могут быть использованы как литейные, так и деформируемые сплавы. Последние имеют широкий интервал кристаллизации и склоны в связи с этим к образованию усадочной пористости и горячих трещин. Большим преимуществом способа литья с кристаллизацией под давлением является возможность получать из деформируемых сплавов плотные отливки и заготовки. Этим способом литья получают слитки диаметром 30— 600 мм,а также отливки с толщиной стенок от 2 до 100 мм и массой от нескольких граммов до 300 кг.

Условия работы, материалы и особенности конструкции пресс-форм. Детали пресс-форм работают в условиях воздействия больших нагрузок и температур, а также физико-химического взаимодействия (коррозия, эрозия, изнашивание) с жидким и затвердевающим металлом. Поэтому основные детали пресс-форм (матрицы, пуансоны, металлические стержни, толкатели) изготавливают из легированных теплостойких инструментальных сталей 5ХНМ, 3Х2В8Ф, 4Х5МФС, 4Х5В2ФС. По конструктивному исполнению матрицы пресс-форм подразделяются на неразъемные (неподвижные и подвижные) и разъемные (с горизонтальной, вертикальной и несколькими плоскостями разъема) — см. рис. 14.7.

Защитные смазки и покрытии дли пресс-форм. Для защиты поверхности пресс-форм применяют технологические смазки: противозадирную смазку алюминол-МГ, представляющую собой суспензию на масляной основе с добавками графитола и дисперсного алюминиевого порошка, а также смазки на основе водных растворов (графитол В-2 и графитол В202) с добавками антифрикционного наполнителя — графита. Для защиты пресс-форм используют также краски и теплоизоляционные покрытия толщиной 0,2—1,5 мм. При нанесении технологических смазок на рабочие поверхности деталей пресс-форм последние подогревают до 120 °С и более.

Преимущества метода ЛКД: получение плотных отливок (с мелкозернистой структурой, отсутствием газовой и усадочной пористости) из литейных и деформируемых сплавов с широким интервалом кристаллизации; обеспечение небольших припусков на обработку резанием; высокая производительность технологического процесса; отсутствие (в большинстве случаев) литниковой системы; большой процент (95%) выхода годных литых изделий.

Основными недостатками способа ЛКД являются большая трудоемкость изготовления и высокая стоимость пресс-форм литья.

14.2.5. Центробежное литье

Данный способ литья представляет собой процесс формирования отливок под действием центробежных сил при свободной заливке металла во вращающиеся формы. Центробежным способом получают отливки из чугуна, стали, сплавов на основе меда, алюминия, цинка, магния, титана и др. Литейные центробежные машины исполняются в трех вариантах: с горизонтальной (рис. 14.9, а), вертикальной (рис. 14.9, б) или наклонной (на рисунке не показана) осью вращения.

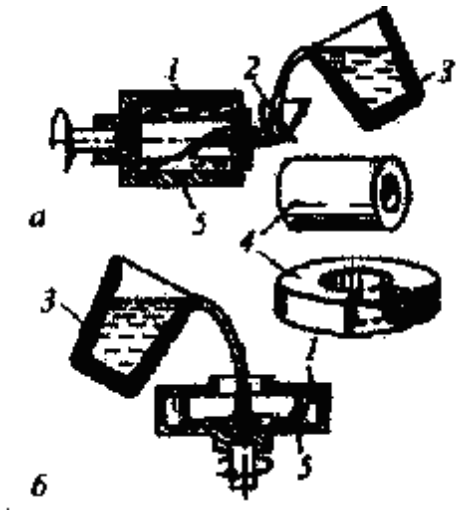

Рис. 14.9. Центробежное литье (в изложницах) с горизонтальной (а) и вертикальной (б) осями вращения: 1 — расплав; 2 — заливочная воронка; 3 — разливочный ковш; 4 — отливка; 5 — изложница

В ряде случаев внутренняя поверхность отливки является свободной, поскольку формируется без непосредственного контакта с литейной формой или стержнем. На рабочую поверхность металлических форм (изложниц), предварительно нагретых (или охлажденных) до 300 °С, наносят огнеупорное покрытие в виде красок, облицовок (например, смесь песка с пульвербакелитом) и других материалов Покрытие повышает стойкость формы снижает скорость охлаждения отливки и возможность образования в ней трещин Оно может также регулировать структуру и состав поверхностных слоев отливки. Существенно повышает качество отливок введение флюса непосредственно в форму в процессе формирования отливки. Флюс подают дозатором в заливочное устройство центробежной машины. Например, при литье гильз из чугуна применяют флюсообразую-щую экзотермическую смесь состава (в % масс.): силикокальция — 8, алюминиевого порошка — 12, натриевой селитры — 14, силиката натрия — 26; плавикового шпата — 20, кузнечной окалины — 20. Флюс рафинирует расплав, защищает его от окисления, а также затормаживает теплоотвод от внутренней свободной поверхности затвердевающей отливки, создавая благоприятные условия для направленной кристаллизации металла в форме. Использование флюсов снижает в 4—6 раз процент брака при центробежном литье.

Расплав заполняет полость литейной формы в затвердевает под воздействием центробежной силы $F_ц$, значительно превышающей силу тяжести $F_т$: $F_ц$-$KF_т$, где K — гравитационный коэффициент (К=3—300). При центробежном литье важной характеристикой, обеспечивающей технологический процесс, является частота вращения формы — число оборотов n в минуту (мин$^{-1}$) или n'—в секунду (с$^{-1}$).

Рассчитаем n для изложницы с горизонтальной осью вращения. При

$F_ц = m\omega^2 R$; $F_т = mg$; $K = \omega^2 R/g$; $D = 2R$; $\omega = (2Kg/D)^{0,5}$

$n = 60\omega/2\pi = 60[(2g)^{0,5}/2\pi](K/D)^{0,5}$;

$n = 60 \cdot 0,705(K/D)^{0,5}$ мин$^{-1}$(об/мин); $n' = 0,705(K/D)^{0,5}$ с$^{-1}$(об/с),

где m — масса расплава, кг; R— радиус тела вращения, м; $D = 2R$— диаметр формы, м; ω — угловая скорость вращения: $\omega = 2\pi n/60$ рад/с; g —ускорение свободного падения, м/с^2.

Коэффициент гравитации зависит от вида формы и состава литейного сплава: $K = 75$ для песчаной формы, $K = 90$—100 для сплавов с узким интервалом затвердевания.

При литье в формы о вертикальной осью вращения коэффициент гравитация равен 100—200. Для расчета оптимальной частоты вращения формы $n_{опт}$ используют также полуэмпирические формулы, например формулу Л. С. Константинова

$$n_{опт} = 17460/(\rho R)^{0,5} \text{ мин}^{-1}, \quad n'_{опт} = 291/(\rho R)^{0,5} \text{ с}^{-1},$$

где ρ — плотность сплава, кг/м^3; $\rho_{эф} = \rho K$; R— радиус формы, м.

Важность выбора частоты вращения формы n обусловлена следующими соображениями. При $n = n_{опт}$ неметаллические включения, шлаки и газовая пористость оттесняются к внутренней поверхности отливок (впоследствии они удаляются механической обработкой). Этим обеспечиваются высокие значения плотности и механических свойств отливки. В случае превышения оптимальных значений частоты вращения ($n > n_{опт}$) возрастает ликвация в отливке, а также опасность образования в ней трещин из-за роста давления (вследствие увеличения $F_ц$). При невысоких частотах вращения ($n < n_{опт}$) отливка плохо очищается от шлаков и газов, в результате чего приобретает шероховатую поверхность.

Центробежное литье применяют также для получения биметаллических изделий, изготавливаемых из композиций типа: сталь—бронза, чугун—бронза, сталь—сталь, сталь—чугун и др. Например; широко используют биметаллические заготовки из следующих пар материалов: жаропрочная сталь Х17Н13М3Т — стеллит (порошковый сплав на основе кобальта с добавками Cr, W, Ni, Si, Fe, C и других элементов), сталь 45 — высокохромистый чугун, сталь 25Л — нержавеющая сталь 08Х18Н10Т и др. Использование биметаллических деталей позволяет экономить дефицитный материал и одновременно повышать в 2—3 раза ресурс работы изделий. В промышленности получение биметаллических заготовок осуществляют, в основном, последовательной заливкой в изложницу сначала одного, а затем (с регламентированным перерывом) другого сплава, формирующих соответственно наружный и внутренний слои отливки.

На центробежных машинах роликового типа получают однослойные и биметаллические заготовки с внутренним диаметром от 0,1 до 1,5 м, длиной от 1,3 до 10 м и массой до 50 т. Толщина стенок полых отливок, полученных центробежным способом, колеблется в пределах 4—350 мм.

Отливки из реакционно-активных металлов можно получать в центробежных машинах, снабженных вакуумной камерой для заливки металла в форму.

Центробежное литье применяют, в основном, для получения пустотелых отливок типа тел вращения (втулки, роторы). Фасонные отливки, как правило, получают в машинах с вертикальной осью вращения. Для получения фасонных изделий применяются песчаные, металлические, керамические и графитовые формы.

Преимуществами данного способа литья являются: большая производительность способа и возможность его автоматизации, высокий выход годного металла (90—95%); высокая плотность и мелкозернистое строение отливок (за счет больших скоростей охлаждения); реализация направленного затвердевания отливок; возможность получения тонкостенных отливок из сплавов с низкой жидкотекучестью.

Недостатки способа: химическая неоднородность (ликвация) в толстостенных отливках; высокие внутренние напряжения в поверхностном слое, способствующие образованию трещин; возможность деформации формы под давлением жидкого металла, в результате чего отливки образуются с подугостью; разностенность по высоте отливок, полученных в машинах с вертикальной осью вращения. Центробежным литьем изготавливают водонапорные и канализационные трубы, гильзы двигателей внутреннего сгорания, поршневые кольца, цилиндры компрессоров, буксы, подшипники качения, втулки, диски, барабаны и др.

14.2.6. Литье выжиманием

Данный способ литья предназначен для получения тонкостенных крупногабаритных отливок посредством свободной заливки расплава (через металлоприемник) в раскрытую форму с последующим заполнением металлом всей ее рабочей полости за счет сближения полуформ (рис. 14.10). Избыток металла выжимается в приемный ковш.

Процесс получения отливки реализуется двумя основными методами: либо поворотом подвижной полуформы вокруг жестко фиксированной оси (рис. 14.10, *а*), либо плоскопараллельным сближением одной или обеих по- луформ (рис.14.10, *б*).

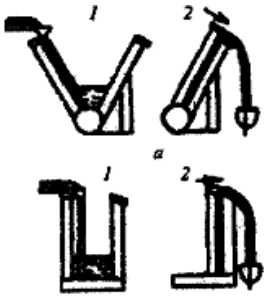

Рис 14.10. Разновидности процесса литья выжиманием:
а — выжимание расплава поворотом подвижной полу-формы; *б* — выжимание расплава плоскопараллельным перемещением подвижной полуформы; *1* — заливка сплава; *2* — сближение полуформ с выжиманием излишка металла

При литье выжиманием используют металлические полуформы с песчаным стержнем. Для повышения стойкости форм их перед заливкой покрывают защитными красками и нагревают до 250 °С. Подогрев полуформ осуществляется нагревателями, размещенными внутри них. Заливку алюминиевых и магниевых сплавов в форму проводят при температуре, превышающей их ликвидус на 80—100 °С, а процесс выжиманий начинают лишь при температуре на 20—40 °С выше ликвидуса.

Оптимальная скорость течения металла в форме (скорость подъема уровня металла), являющаяся важным параметром технологического процесса, составляет 0,3—0,7 м/с. Затвердевание отливки начинается уже в процессе движения расплава в форме и заканчивается соединением корочек металла, намороженных на стенках сближающихся полуформ. При соприкосновении полуформ возникает зона контакта поверхностей соединяемых корочек металла, которая представляет собой наиболее уязвимую дефектную область отливки.

Основные дефекты отливок при литье выжиманием: раковины, рыхлоты, трещины, волнистость поверхности; несоответствие фактических размеров отливки размерам, заданным чертежом; коробление отливок.

Литьем выжиманием изготавливают отливки, в основном, из алюминиевых (АЛ2, АЛ4, АЛ9, АЛ4М, АЛ34, АЛ23-1) и магниевых (МЛ5, МЛ6) сплавов. Однако крупногабаритные отливки панельного и оболочкового типа (например, детали холодильников и теплообменных аппаратов и др.) размерами 1,0—2,5 м и толщиной стенок 1,5—5,0 мм получают из алюминиевых сплавов, поскольку сплавы магния склонны к окислению и образованию микрорыхлот.

Преимуществами способа литья выжиманием являются: возможность получения крупногабаритных тонкостенных отливок; отсутствие литниковой системы; возможность выжимания металла в форму в суспензионном состоянии (при температурах между солидусом и ликвидусом).

Недостатки способа литья: пониженная точность размеров отливок (по сравнению с литьем в металлические формы) из-за неточной стыковки полуформ; низкий выход годного литья (25—50%).

14.3. Способы литья с непрерывным процессом формирования отливки

14.3.1. Непрерывное и полунепрерывное литье

Непрерывным литьем называют процесс получения протяженных отливок посредством свободной непрерывной заливки расплава в водоохлаждаемую форму (кристаллизатор) и вытягивания из нее сформированной части отливки. Данный способ называют полунепрерывным литьем, если накладывается ограничение на подачу металла (по времени или массе).

Исходя из расположения кристаллизатора и технологической оси процесса (направления вытяжки заготовки), непрерывное (полунепрерывное) литье подразделяют на горизонтальное и вертикальное. При горизонтальном литье металл отливки меньше подвержен окислению и загрязнению шлаковыми включениями, поскольку он сначала попадает в специальный металлоприемник (например, в разливочную печь), а уже из него в кристаллизатор. Вертикальное литье является более эффективным при получении полых заготовок.

В зависимости от материала рабочей полости литейные формы (кристаллизаторы) 2 (рис. 14.11) подразделяют на металлические (выполненные из меди, алюминия, стали) или графитовые. В последнем случае используются графитовые вставки, которые могут быть монолитными или полыми. Благодаря высокому комплексу теплофизических свойств графита (термостойкость, высокая теплопроводность, низкий коэффициент, трения, несмачиваемость металлами) графитовые кристаллизаторы получили приоритетное применение по сравнению с металлическими.

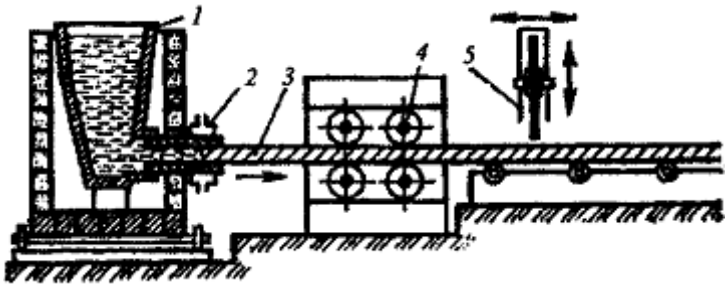

Рис. 14.11. Схема установки непрерывного горизонтального литья:
1— раздаточная печь; 2 — литейная форма (кристаллизатор); 3 — затвердевшая часть отливки; 4 — ролики для вытяжки отливки; 5 — пила (резак)

Внутренняя рабочая полость кристаллизатора, непосредственно контактирующая с расплавом, охлаждается водой (рис. 14.11). Она формирует в соответствии с конфигурацией своего поперечного сечения профиль будущей отливки. При выборе протяженного размера кристаллизатора учитываются теплопроводность и технологические свойства материала отливки, а также площадь ее поперечного сечения. Так, для литья сплавов на основе алюминия и меди используют кристаллизаторы длиной до 300 мм, а стали и чугуны льют в значительно (в 3—5 раз) более длинные формы.

В кристаллизаторе возникает большой градиент температур по сечению отливки, что создает условия для ее последовательного затвердевания. При этом завершение затвердевания происходит либо в кристаллизаторе, либо уже вне его. Для регулирования скорости кристаллизации отливки (по ее периметру) специально вводят в зазор между графитовой вставкой и корпусом формы (кристаллизатора) слой теплопроводной пасты. Обычно толщина этого слоя плавно изменяется от минимальной (в верхней зоне отливки) до максимальной (в нижней). В случае затвердевания отливки вне кристаллизатора в ней некоторое время сохраняется еще жидкое ядро, активно отдающее свою теплоту поверхностному слою. При отсутствии внешнего интенсивного охлаждения это может привести к резкому нагреву поверхности. По мере удаления от формы жидкое ядро отливки охлаждается, при этом механизм кристаллизации может измениться от последовательного к объемному, что вызовет изменение свойств изделия.

На рис. 14.11 представлена схема установки для горизонтального литья. Расплав в кристаллизатор 2 поступает из раздаточной печи *1*. Затвердевающая часть отливки 3 вытягивается (обычно в прерывистом режиме) из формы 2 с помощью роликов 4. При этом отливку периодически разделяют на части определенного размера пилой (или резаком) 5. В процессе непрерывного литья чугуна скорость вытяжки (при ее продолжительности 1—10 с) колеблется в пределах 3,3—33 мм/с.

В данном случае продолжительность остановки (2—20 с) в среднем значительно превышает время вытягивания. Полунепрерывное литье основано на получении отливки за один цикл с перерывом в подаче расплава, необходимым для подготовки последующего цикла литья.

Преимуществами способа непрерывного литья являются: неограниченность длины отливки; однородность свойств отливки по длине; повышенная плотность металла; реализация направленного затвердевания; отсутствие литниковой системы; большой процент выхода годного металла; повышенные точность и чистота поверхности отливки; отсутствие операции выбивки форм, обрубки и очистки отливок; относительно невысокая стоимость литейных форм; повышенная производительность труда.

К недостаткам данного способа литья можно отнести: возможность изготовления отливок не очень сложной конфигурации; ограниченность номенклатуры изделий.

Методом непрерывного (или полунепрерывного) литья изготавливают трубы с широким диапазоном размеров (диаметром до 1000 мм), втулки для гильз дизельных двигателей, заготовки для гаек, шестерен, прокатных валков и др.

14.3.2. Электрошлаковое литье (ЭШЛ)

Сущность процесса ЭШЛ заключается в постепенном электрошлаковом переплаве расходуемого электрода 1 (рис. 14.12) в водоохлаждаемой металлической форме 5 и последующей кристаллизации расплавленного металла в ней.

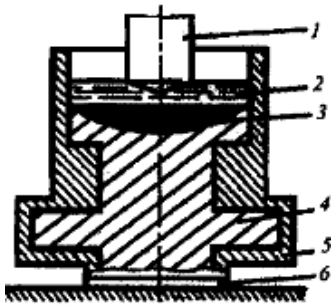

Рис. 14.12. Схема получения отливок способом электрошлакового литья: *1* — расходуемый электрод; *2* — шлаковая ванна; *3* — металлическая ванна; *4* — отливка; *5* — литейная форма; 6— поддон

При прохождении электрического тока через расплав шлака 2 в нем (вследствие высокого электрического сопротивления) выделяется большое количество теплоты, в результате чего шлак нагревается на 150—300 ^{0}С выше температуры плавления металлического сплава (материала расходуемого электрода *1*). При этом происходит оплавление конца электрода; жидкий металл в виде капель пронизывает шлак, одновременно очищаясь в нем, и скапливается под шлаком, образуя металлическую ванну 3. Слой расплава, расположенный вблизи кристаллизатора, затвердевает быстрее. Расход электрода компенсируется его перемещением вниз (в вертикальном направлении).

Отливки условно подразделяют на две группы: отливки сплошного сечения (рис. 14.12) и отливки с внутренними несквозными полостями (рис. 14.13). Если в обоих случаях внешняя поверхность отливки соответствует конфигурации литейной формы-кристаллизатора, то внутреннюю полость в ней выполняют с помощью водоохлаждаемого металлического стержня 3 (рис. 14.13).

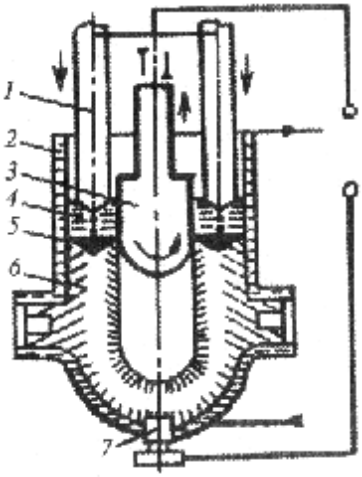

Рис. 14.13. Получение отливки корпуса запорной арматуры способом ЭШЛ:
1 — расходуемый электрод; 2 — литейная форма, 3 — водоохлаждаемый металлический стержень; *4*— шлаковая ванна; 5 — металлическая ванна; 6 — отливка; 7— затравка

При литье корпуса запорной арматуры (рис. 14.13) в медный кристаллизатор 2 заливают предварительно расплавленный шлак (фторид кальция), в который погружают электроды *1*; к ним и затравке *7*, находящейся в нижней части кристаллизатора, подводят электрический ток около 20 А с напряжением 45—60 В на 1 мм диаметра электрода. Далее процесс протекает по ранее изложенной схеме.

Вследствие затекания жидкого шлака в зазор между формой и отливкой сводится до минимума взаимодействие расплавленного металла с материалом формы. При этом поверхность отливки получается чистой, гладкой и часто не нуждается в последующей механической обработке.

В связи с последовательным оплавлением электрода (или электродов) и направленной кристаллизацией небольших порций металла отливки приобретают повышенную химическую и структурную однородность: в отливках отсутствует ликвация, возрастает их плотность и уменьшается количество вредных примесей и металлических включений в них. Все это обеспечивает отливкам высокие механические свойства.

Конструктивно-технологические особенности ЭШЛ (совмещение операций расплавления металла в плавильном агрегате с заливкой его в форму, последовательное плавление электрода, рафинирование металла шлаком, направленная кристаллизация отливки, высокая однородность структуры — отсутствие усадочных раковин и осевой рыхлости) позволяют осуществлять процесс литья без использования элементов литниковых систем (питателей, выпоров и прибылей). Повышенные эксплуатационные свойства отливок, полученных методом ЭШЛ, допускают наличие в них острых углов и резких переходов от сечения к сечению. В результате применения данной технологии повышается коэффициент использования металла. Способ может успешно заменить ряд операций, выполняемых ковкой, штамповкой и сваркой, при изготовлении ряда ответственных деталей. Электрошлаковым литьем получают как мелкие отливки массой в десятки граммов (зубные протезы), так и крупные — массой до 100 т и более (валки для холодной прокатки, сосуды сверхвысокого давления, коленчатые валы и шатуны судовых дизельных двигателей, детали арматуры — корпуса клапанов и задвижек электростанций и др.).

Контрольные вопросы

1. Назовите стадии процесса получения оболочковых форм.
2. Перечислите основные группы модельных составов, используемых при литье по выплавляемым моделям.
3. По каким признакам классифицируются кокили?
4. Каковы составы и методы формирования покрытий на кокилях?
5. В чем сущность физико-химических процессов, протекающих при лиги сплавов под давлением? Как это отражается на свойствах отливок?
6. Каковы принципиальные особенности технологического процесса литья под низким давлением?
7. Каковы преимущества и недостатки литья вакуумным всасыванием?
8. Как классифицируются процессы формирования отливок при литье с кристаллизацией под давлением?
9. Назовите основные варианты конструкций центробежных машин.
10. В чем сущность способа литья выжиманием? Для литья каких изделий он предназначен?
11. Чем отличаются разновидности способов непрерывного и полунепрерывного литья?
12. Каковы конструктивно-технологические особенности электрошлакового литья?