

Особенности затвердевания алюминиевых сплавов в вакуум-пленочной форме (ВПФ) с холодильником

Высокую плотность рабочей зоны отливок с пористостью ниже 1 балла шкалы ВИАМ, величину пор менее 100 мкм, мелкозернистую структуру с хорошей обрабатываемостью резанием, практически невозможно получить при изготовлении отливок в песчано-глинистые формы. Этому способу литья свойственна низкая скорость кристаллизации, что приводит к получению отливок с невысокими механическими свойствами, крупнозернистой структурой, повышенной газо-усадочной пористостью. Кроме того, пористость может образовываться за счет появления газовых пузырей при взаимодействии металла с формой, содержащей влагу.

Для улучшения тепловых условий затвердевания отливок в песчано-глинистых формах, получения направленной кристаллизации и повышения герметичности отливок, особенно из алюминиевых сплавов, применяют холодильники. При литье в песчано-глинистые формы с холодильником необходимо предотвращать конденсацию на нем влаги из атмосферы и формы или предусматривать средства для отвода от него газов (паров), образующихся при заливке металла в форму. В первом случае для предотвращения конденсации паров холодильники культивируются, а во втором на них нарезаются газоотводящие каналы. Технологический процесс культивирования сложен, трудно контролируем и при недостаточной просушке может приводить к дополнительному образованию раковин в отливке за счет выгорания олифы. При этом слой сухого кварцевого песка между холодильником и отливкой ухудшает условия теплообмена.

Анализ существующих способов изготовления отливок в песчано-глинистых и в песчаных формах со связующим (литье в сырые и сухие формы, оболочковые формы, формы из ХТС и т. д.), а также в песчаных формах без связующего (ВПФ) показывает, что наиболее перспективным способом изготовления качественных отливок является метод ВПФ с применением холодильников, имеющих нарезные каналы. При использовании ВПФ выявляются следующие преимущества:

- влажность формовочного песка не превышает 0,4%;

- контакт формы (песка) с холодильником ограничен пленкой, поэтому конденсат из формы, образующийся на внутренней стороне пленки со стороны песка, отсасывается вакуумом;

- выделение конденсата на холодильнике из атмосферы возможно, но незначительно, так как температура холодильника имеет температуру окружающей среды (цеха). При этом каналы на холодильнике обеспечивают отвод образующихся паров за счет своего объема и вакуума в форме;

- каналы на холодильнике увеличивают площадь контакта отливки с холодильником, что повышает скорость теплоотвода.

Применение наружных холодильников при ВПФ позволяет при качественном воспроизведении сложной геометрии получать в требуемых поверхностных областях отливки измельченную структуру, характерную для литья в металлическую форму. При этом при прочих равных условиях наблюдается более мелкая структура в случае ВПФ, чем при литье в кокиль. Отношение (D) средней величины зерна (d_1) (или аналогичного структурного параметра) при литье в кокиль к величине зерна (d_2) в случае ВПФ с холодильниками колеблется от 1,1 до 2,0 в зависимости от химического состава сплава и конкретных условий охлаждения. Все это справедливо лишь для зоны непосредственного влияния холодильника.

Известно, что d обратно пропорционально скорости затвердевания V_x с некоторой степенью k . Такого же рода зависимость действительна и для скорости охлаждения V_l . Предполагается, что измельчение структуры при ВПФ связано с более высокими значениями V_x и V_l , чем при обычных условиях кокильного литья.

Для проверки проведено сравнительное термометрирование затвердевания плоских горизонтальных отливок 150x150x50 мм из сплава АЛ9М (сплав Al-Si-Cu-Mg), залитых на бронзовый холодильник (в открытой сверху форме) при вакуумировании и без него. Термопары устанавливались в центре на расстоянии 1, 11 и 21 мм от холодильника. Выполнено также сравнительное термометрирование вертикальных плоских отливок 300X300X40 мм из сплава АЛ24П (сплав Al-Mg-Zn) с двухсторонними внешними бронзовыми холодильниками при вакуумировании и без него. Термопары в этом случае помещались в центре отливок (20 мм от холодильников) на половине высоты и длины отливок.

Во всех случаях холодильники имели регулярный рельеф следов механической обработки с перепадом высот 0,55 мм и шагом 0,6 мм, а также сетку прямоугольной насечки шагом 0,6 мм, глубиной 1 мм и шириной риски на поверхности 1 мм. Остаточное давление составляло 0,12 МПа. Использовали хромель-алюмелевые термопары и электронный потенциометр КСП-4.

Анализ температурных кривых в опыте со сплавом АЛ9М показал, что продвижение фронтов температур в интервале затвердевания можно с достаточной точностью описать уравнением

$$X = K_t \cdot \tau^n, \quad n = 0,65, \quad /1/$$

где X —расстояние от холодильника;

τ —время от начала затвердевания; n — показатель степени, характеризующий свойства сплава; K_t — коэффициент, определяющий скорость продвижения фронта температуры t .

По температурным кривым были определены значения K_t для температуры солидуса : $K_{s1} = 1,3$ мм/с для обычных условий; $K_{s2} = 3,7$ мм/с при вакуумировании.

Считая, что температура отливки в момент начала затвердевания равна температуре ликвидуса t_L , из уравнения /1/ можно вывести следующие

соотношения для скорости затвердевания и скорости охлаждения:

$$V_{xi} = n \cdot X^{(1-\frac{1}{n})} \cdot K_{si}^{\frac{1}{n}} \quad /2/$$

$$V_{ti} = (t_L - t_S) \cdot \left(\frac{K_{si}}{X}\right)^{\frac{1}{n}} \quad /3/$$

где индекс $i=1$ для обычных условий, $i=2$ при вакуумировании.

Пользуясь последними формулами и зависимостями d от V_x и V_t , можно выразить отношение структурных параметров D следующим уравнением

$$D = \left(\frac{K_{s2}}{K_{s1}}\right)^{\frac{k}{n}}, \quad /4/$$

где k —показатель степени в зависимости d от V_x , равный показателю степени в зависимости d от V_t , что следует из уравнений для D , полученных по V_x и по V_t . По данным Х. Джонеса [1] для бинарных алюминиевых сплавов, величину показателя степени k можно считать равной 0,3.

Подставляя численные значения в формулу /4/, получаем значение $D=1,7$.

Результаты эксперимента со сплавом АЛ24П не позволяют сделать такой же подробный анализ, но дают возможность воспользоваться приближенной формулой

$$V_{ti} = \frac{t_L - t_S}{\tau_{3l}} \quad /5/$$

где τ_{3l} — время конца затвердевания отливки, определяемое по температурной кривой охлаждения ее центра. Для обычных условий $\tau_{3l}=12$ с, при вакуумировании $\tau_{32} = 5$ с.

Используя формулу /5/ и зависимость d от V_t , получим соотношение

$$D = \left(\frac{\tau_{3l}}{\tau_{32}}\right)^k \quad /6/$$

Подставляя численное значение в эту формулу, получим $D=1,3$.

Таким образом, данные термического анализа количественно хорошо согласуются с данными структурных наблюдений и подтверждают преимущества способа ВПФ для удовлетворения требований, предъявляемых к качественным отливкам.

Для прогнозирования структуры при проектировании технологии ВПФ необходимо качественно и количественно определить физические причины ускоренного охлаждения при этом способе литья.

Анализ результатов и условий проведения описанных опытов приводит к выводу о том, что изменение параметров затвердевания связано только с изменением условий теплопередачи на границе «отливка — форма». Исследованиями установлено, что для алюминиевых сплавов может быть использована модель граничной теплопередачи в металлическую форму, включающая теплоотвод через постоянную площадь плотного контакта (без

учета теплового сопротивления стягивания) и теплоотвод по остальной площади через усредненный воздушный зазор постоянной толщины, теплопередача в котором осуществляется в основном теплопроводностью. По этой модели граничная теплопередача определяется двумя параметрами: относительной номинальной площадью плотного контакта η и толщиной воздушного зазора l_z . При некоторых допущениях эти величины можно связать уравнением

$$l_z = \frac{1}{2} [H_d \cdot S_d + (1 - \eta - S_d) \cdot (H_n \cdot S_n + (1 - S_n) \cdot H_p)] \quad /7/$$

где H_d — усредненная максимальная глубина дефектов газоусадочного происхождения на поверхности отливки;

S_d — относительная площадь дефектов на поверхности отливки;

H_n — максимальная глубина насечки на холодильнике;

S_n — относительная площадь, занимаемая рисками насечки на поверхности холодильника;

H_p — максимальный перепад высот рельефа следов механической обработки на холодильнике. Специальные измерения показали, что в опыте со сплавом АЛ9М для вакуумированного холодильника $\eta = 0,44$ (44%) $l_z = 0,07$ мм, для невакуумированного холодильника $\eta = 0,01$ (1%), $l_z = 0,14$ мм. Численное моделирование температурного режима отливок с подстановкой этих параметров дало удовлетворительное совпадение расчетного и опытного времени затвердевания отливок.

В процессе формирования поверхности отливки разрежение между поверхностями формы и отливки создает эффект «всасывания» жидкого и затвердевающего металла в пустоты микро- и макрорельефа холодильника, что существенно увеличивает η и уменьшает l_z . Распространение разрежения по поверхности холодильника происходит по каналам насечки и каналообразным впадинам рельефа следов механической обработки. Такие представления диктуют определенные требования к рельефу холодильника.

Описанная модель граничной теплопередачи и экспериментально найденные значения параметров теплопередачи и затвердевания позволяют анализировать и оптимизировать проектируемую технологию ВПФ с холодильником.

Исследования влияния толщины холодильника на плотность рабочей зоны изделий, изготовленных по ВПФ из литейных алюминиевых сплавов, показали, что для получения отливок с пористостью ниже 1 балла шкалы ВИАМ, мелкозернистой структурой на расстоянии 20 мм от холодильника, толщина его должна быть ≥ 60 мм. Численное моделирование (СКМ ЛП «Полигон») температурного режима отливки и холодильника показало, что глубина затвердевшего слоя в период интенсивного теплоотвода (т. е. слоя с мелкой структурой) зависит от температурного режима холодильника, который в свою очередь определяется его геометрией и теплофизическими

свойствами. Поэтому были проведены исследования влияния материала холодильника (графит В1, графит РЭКТИМ, сталь и медь) на скорость охлаждения отливок заэвтектических (30% Si) силуминов. По ВПФ отливали коробки размером 160х160х60 мм с толщиной стенки 20 мм.

Холодильники использовали с рифленой поверхностью, что увеличивало площадь контакта металл — холодильник при охлаждении отливки. Хромель-алюмелевые термопары устанавливали в центре коробок на расстоянии 20 мм от холодильника.

Использование холодильников при изготовлении отливок из высококремнистых алюминиевых сплавов по ВПФ способствует измельчению первичного кремния до ~50 мкм (рис. 1), в то время как типичный размер первичного кремния в силумине с 30% кремния оставляет 300 мкм [2]. Сохраняется общая тенденция укрупнения первичного кремния при увеличении расстояния от холодильника. В структуре исследуемых сплавов практически отсутствует эвтектический кремний на расстоянии до 20 мм от холодильника, что объясняется высокой скоростью охлаждения расплава и отсутствием эвтектического превращения.

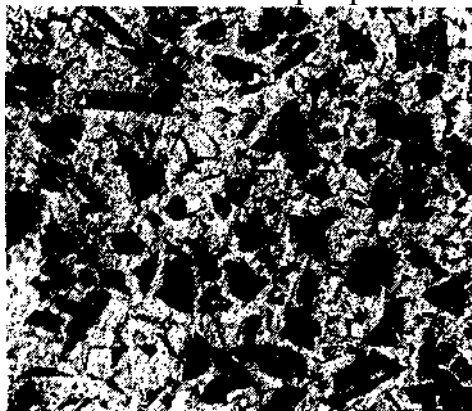


Рис. 1. Микроструктура сплава Al — 30% Si, полученного методом ВПФ с использованием холодильника. X200

Самая высокая скорость охлаждения исследуемых высококремнистых силуминов в интервале кристаллизации наблюдается при использовании медного холодильника, затем из графита РЭКТИМ, потом стального и из графита В1 (рис. 2).

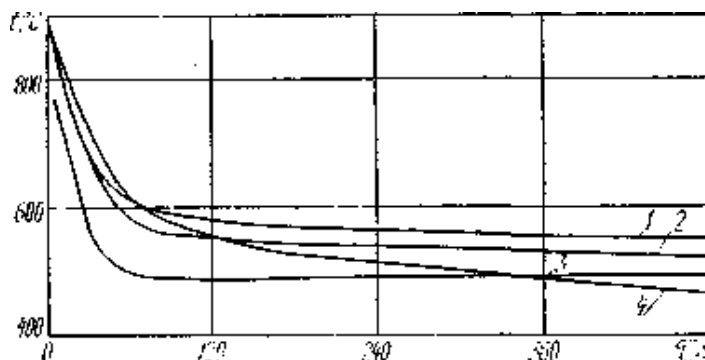


Рис. 2. Влияние материала холодильника на скорость

охлаждения сплава системы Al—Si.

Материал холодильника: 1-графит В1; 2 — графит РЭКТИМ; 3 — медь М1; 4 — сталь

Таким образом, способ ВПФ с холодильниками является наиболее оптимальной литейной технологией для изготовления качественных отливок.

Проведенные исследования позволяют рекомендовать следующие технологические параметры: медные или графитовые (РЭКТИМ) холодильники толщиной не менее 60 мм, газоотводные каналы на поверхности холодильника глубиной 1,0 мм.

Описанный в статье подход к теплофизическим процессам при ВПФ с холодильником дает возможность анализа и оптимизации технологии с помощью численного и аналитического моделирования

Список литературы

1. Sohes H. Microstructure of Rapidly Solidified Materials// Mater. Sci. and Engin. – 1984 –V. 65 – p. 145-156
2. Г.Б. Строганов, В.А. Ротенберг, Г.Б. Гершман. Сплавы алюминия с кремнием// М. – Металлургия – 1977 г. – 271 с.