

Министерство высшего и среднего специального  
образования БССР

БЕЛОРУССКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

на правах рукописи

**Н.К.ИГНАТКИ**

**ИЗУЧЕНИЕ ТЕПЛОМОЩНОГО РЕЖИМА ОТКАЛКИ И РАЗРАБОТКА  
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ПО ИЗУЧЕНИЮ ПОВЕРХНОСТИ И СНИЖЕНИЮ  
ВОЗМОЖНОСТИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИНЫ ЛУЧЕВ ПОД ДАВЛЕНИЕМ**

(Специальность 05.323 "Атомное производство")

**А в т о р е ф е р а т**

диссертации на соискание ученой  
степени кандидата технических наук

Минск 1972

Работа выполнена на кафедре теоретической и общей теплотехники, в литейной лаборатории кафедры "Машины и технологии литейного производства" Белорусского ордена Трудового Красного Знамени политехнического института и на Минском моторном заводе.

Научный руководитель -  
член-корреспондент АН БССР, доктор  
технических наук, профессор А.И.ВЯЙНИК

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор

Л.С.КОНСТАНТИНОВ

кандидат технических наук, старший  
научный сотрудник А.И.ХРАПЧЕНКОВ

Ведущее предприятие -

Минский завод им.Вавилова.

Автореферат разослан " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 1972 г.

Защита состоится " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 1972 г.

на заседании Объединенного Совета по присуждению ученых степеней по механико-технологическим, машиностроительным, автотракторным и торфяным специальностям при Белорусском ордена Трудового Красного Знамени политехническом институте.

Оказы просим направлять по адресу: Минск, 27, ленинский проспект, 65, белорусский политехнический институт, ученому секретарю Совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института

ученый секретарь Совета  
кандидат технических наук, доцент

И.В.КИСЛОВ

## В В Е Д Е Н И Е

В современном машиностроении все в большей степени применяются легкие цветные сплавы. В автомобильных двигателях вес деталей из алюминиевых сплавов составляет 25-30%. Из них 50% по весу изготавливаются литьем под давлением. На Заволжском моторном заводе отливается самая крупная в мире отливка-блок восьмицилиндрового автомобильного двигателя (вес заливаемой порции металла 42 кг). Широко применяется литье под давлением в приборостроении, электротехнической промышленности, радиоэлектронике.

Литье под давлением находит применение все в новых отраслях промышленности благодаря ряду преимуществ по сравнению с другими способами литья. Отливки, получаемые этим способом, имеют высокую чистоту поверхности и геометрические размеры, максимально приближающиеся к размерам готовой детали. Литье под давлением легко поддается механизации и автоматизации, дает большую экономию в затратах труда в условиях массового производства отливок. Поэтому литье под давлением успешно конкурирует с другими способами получения отливок и имеет хорошие перспективы в дальнейшем развитии и совершенствовании.

Однако литье под давлением присущ ряд недостатков, вызванных особенностями процесса формирования отливки. Заполнение формы происходит настолько быстро (в десятые и даже сотые доли секунды), что металл разбрызгивается на отдельные капли и струи, которые часто не успевают слиться в единый поток до окончания заполнения и начинают затвердевать. В результате отливки получаются с неровной поверхностью, что снижает их коррозионную стойкость и препятствует нанесению защитных покрытий.

При быстром заполнении воздух, находящийся внутри полости формы, не успевает выйти наружу через вентиляционные каналы, смешивается с металлом, образуя затем в отливке воздушно-газовую пористость, которая снижает прочность, герметичность детали, препятствует их термообработке.

Из сказанного видно, что выбор правильного теплового режима отливки и формы имеет большое значение для получения качественных изделий. Если металл не начнет кристаллизоваться до окончания заполнения формы, то отливка получится с гладкой поверхностью. Если

правильно выбрать тепловой режим литья, то можно уменьшить скорость заполнения формы, что дает возможность более эффективно организовать газоудаление и, следовательно, снизить пористость отливок.

В связи с вышеизложенным была поставлена задача изучить тепловой режим формирования отливки при литье под давлением и на этой основе разработать рекомендации по улучшению поверхности и снижению пористости изделий.

С целью улучшения поверхности отливок необходимо рассчитывать максимально допустимое время заполнения формы по полученным в работе формулам. С целью снижения пористости отливок предложено вентилировать форму посредством игольчатых вставок. Разработаны способы изготовления вставок, получены формулы для расчета их потребной площади. Производственные испытания игольчатых вставок проведены в цехе алюминиевого литья Минского моторного завода. Снижение брака дало экономию 196,0 р. на тонне литья.

## Г Л А В А I

В первой главе диссертации приведен обзор литературы по теоретическому и экспериментальному изучению процесса заполнения полости формы, тепловому режиму отливки и прессформы, сформулирована задача исследования.

Из приведенного обзора литературы видно, что в большинстве выполненных работ теоретически и экспериментально исследовался процесс заполнения формы и на основе этого выдавались рекомендации по расчету литниковой системы и вентиляционных каналов, по выбору давления и скорости прессования. Много работ посвящено исследованию газового режима прессформы и расчету вентиляционных каналов, располагаемых в плоскости разъема. В работах ряда авторов показано, что вентиляционные каналы оказывают большое влияние на уменьшение противодавления в форме в процессе ее заполнения и, следовательно, на снижение пористости литья. Однако с помощью вентиляционных каналов не всегда можно полностью удалить воздух из полости формы. Эффективным способом уменьшения противодавления и снижения пористости отливок является предварительное создание разрежения в форме при помощи вакуума. Расчетом технологических режимов литья под давлением с применением вакуума посвящено много работ как советских так и зарубежных авторов.

Однако для осуществления процесса литья с применением вакуу-

и необходима дорогостоящая оснастка. Кроме того, в условиях увеличенной степени разрежения газобразующие составляющие смазки при заполнении полости формы жидким металлом сгорают и возгораются, что отрицательно влияет на качество отливок и сводит иногда на нет все преимущества литья с применением вакуума.

В связи с этим представляется более целесообразными, в большинстве случаев, для снижения пористости литья более тщательно обрабатывать систему газосушения. С этой целью предложено вентилировать глухие места полости формы с помощью пористых фильтров-жестовок.

Из приведенного обзора литературы видно, что качество изделий, полученных литьем под давлением, зависит от правильного выбора технологических параметров литья, таких как давление на металл во время заполнения и подпрессовки, скорости прессования, конструкции литниково-вентиляционной системы, режима смазки и т.д.

Однако подробный анализ факторов, влияющих на процесс формирования отливки показывает, что определяющим звеном в цепи этих факторов является тепловой режим, а выбор всех остальных факторов должен быть подчинен идее создания наиболее благоприятного теплового режима формирования отливки, который может быть обеспечен при заполнении формы в соответствии с двумя различными принципами — максимального и минимального трения.

В первом случае (литатель имеет узкое сечение впуска) металл заполняет форму с высокой скоростью, беспорядочно, смешиваясь с воздухом, в результате чего в отливке получается малая распределенная по всему объему (кроме поверхности) пористость, которая не только неизбежна, но и желательна. Если тепловой режим отливки выбран неправильно, то пористость получается также на поверхности. Поэтому при заполнении формы с максимальным трением первоочередное значение имеет исследование процесса формирования поверхности отливки.

Во втором случае (литатель плавно переходит в тело отливки) заполнение формы происходит спокойно, без перемешивания металла с воздухом, в результате чего отливка получается с гладкой поверхностью, но с крупными порами внутри. Поэтому в данном случае необходимо изучить возможность осуществления хорошей вентиляции полости формы.

Исходя из вышесказанного поставлена задача изучить процесс формирования поверхности отливки при заполнении формы с максималь-

ным трением, процесс вентиляции при заполнении формы с минимальным трением и на основании этого разработать мероприятия по улучшению поверхности и снижению пористости отливок.

## Г Л А В А П

Вторая глава посвящена исследованию и разработке методов устранения поверхностных дефектов отливки. Теоретически рассмотрен процесс формирования поверхности отливки при заполнении формы с максимальным трением (при заполнении с максимальным трением мелкая пористость, как впервые показал Л.С. Константинов, необходима, так как пузырьки газа, находящиеся под большим давлением, распирают отливку, чеманят ее контуры). Экспериментально исследованы тепловые условия образования плотной поверхностной корки отливки. Получена формула для определения минимально допустимого времени заполнения формы. Отливки, время заполнения которых рассчитано по полученной формуле, не имеют дефектов поверхности.

Интересной особенностью литья с максимальным трением является то, что поры получаются во всем объеме отливки, кроме поверхности. Эффект образования плотной корки можно объяснить захлопыванием пузырьков газа под действием давления, возникшего в пристеночном слое эмульсии в момент удара о поверхность прессформы. Физическая суть механизма захлопывания заключается в следующем. При соударении со струей часть поверхности прессформы соприкасается с металлом, часть с газом, который содержится в металле в виде отдельных включений. Чем выше пористость эмульсии, тем больше газовых литейных выходов на этой поверхности и больше суммарная площадь, которую они занимают.

В начальный момент соударения высокое давление возникает лишь на поверхности соприкосновения с металлическими частицами, обладающими много большей плотностью, чем газовые. На поверхности соприкосновения с газовыми пузырьками давление практически не отличается от такового в свободной струе (составляет несколько бар). Под действием появившейся разности давления (между металлическими и газовыми частицами), металл растекается по поверхности прессформы, отжимая каждый данный пузырек газа внутрь и сжимая его. Суммарная площадь соприкосновения формы с газом быстро уменьшается до нуля и поверхностной пористости не образуется, если скорость впуска превышает определенный предел. Минимальная скорость струи, обеспечивающая плотную поверхность, может быть найдена из условия, согласно которому движущиеся навстречу друг другу по поверхности струйки (в виде капель) растекающегося металла (он обнимает-захлопывает газовый пузырек) обладают достаточно высокими температурой и

кинетической энергией, чтобы слиться (свариться) при встрече.

Сваривание краев (клиньев) металла происходит, если его скоростной напор превышает капиллярное давление внутри клина (если преодолеваются силы поверхностного натяжения). Минимальная необходимая скорость впуска металла, при которой преодолеваются силы поверхностного натяжения и обеспечивается образование на поверхности отливки плотной корки толщиной  $\Delta K = 2\gamma$  определяется из выражения

$$W_{\min} = \sqrt{2 \frac{\sigma}{\rho}} \text{ м/сек,} \quad (I)$$

где  $W_{\min}$  - минимальная скорость впуска, м/сек;  $\gamma$  - радиус края растекающегося металла, м;  $\rho$  - плотность жидкого металла, кг/м<sup>3</sup>;  $\sigma$  - коэффициент поверхностного натяжения расплавленного металла, н/м.

Расчеты по приведенной формуле показывают, что для получения плотной корки толщиной  $\Delta K = 0,02 \text{ мм} = 0,00002 \text{ м}$  на поверхности отливки из алюминиевого сплава ( $\gamma = 0,01 \text{ мм} = 0,00001 \text{ м}$ ) необходима минимальная скорость впуска, равная 6,5 м/сек, а для отливки из цинкового сплава - 4,8 м/сек. С увеличением радиуса  $\gamma$  скорость  $W_{\min}$  уменьшается.

Эффект захлопывания газовых пузырьков срабатывает не только при определенной скорости, но и при определенной температуре. Если температура краев металла, охватывающих пузырек, опустится ниже некоторого минимального значения, то кинетической энергии струи окажется недостаточно для захлопывания. Край металла не сварится и на поверхности изделия образуются дефекты. При сваривании расплава преодолеваются силы поверхностного натяжения его краев. Эти силы возрастают с понижением температуры эмульсии. На эффект сваривания основное влияние оказывает температура прессформы. В связи с этим встает задача определения теплового режима прессформы и его согласования с эффектом захлопывания пузырьков.

Эксперименты по изучению теплового режима отливки и прессформы были проведены на машине модели 5A12 с горизонтальной камерой прессования. На этой машине за счет сменных плунжеров удается получить давления прессования 400, 600 и 1500 бар. Скорость прессования определяется магнито-электрическим датчиком, а усилие - тензодатчиками, наклеенными на переходах между штоками прессующего плунжера и гидроцилиндра. Изучены сплавы АЛ2, АЛ3, АЛ4 и АЛ10.

Оформленная полость прессформы выполнена набором вставок, путем замены которых можно менять конфигурацию и толщину отливки, размеры литателя и место подвода металла. Вставки изготовлены из стали 3Х2В8Ф. Наибольшую трудность представляет измерение температуры расплава при условиях высокой скорости течения, а также температуры поверхности прессформы. Температура расплава определяется с помощью хромель-алюмелевой термопары, горячие концы электродов которой замыкаются самим металлом, а также термопары, электроды которой были одеты стеклотканью и помещались в специальной канавке в плоскости разреза прессформы.

Температура рабочей поверхности прессформы измеряется с помощью термопар, горячие концы которой намотаны, расклепаны и приварены к поверхности стальной цилиндрической вставки точечной электросваркой. Вставка устанавливается в предусмотренном в матрице отверстии так, чтобы ее поверхность была заподлицо с поверхностью матрицы. Этого рода термопара дает усредненные значения температуры на глубине до 0,1 мм.

Температура предварительного подогрева формы измерялась с помощью термопар, изготовленных по тому же способу, как и термопары для измерения температуры поверхности прессформы, но имеющих выступающие на 0,3 мм головки электродов для лучшего контакта с формой.

Сигналы от термопар и магнито-электрического датчика фиксируются непосредственно влейфовым осциллографом типа Н105. Сигналы от тензодатчиков подаются на осциллограф через усилитель ТА5.

Проведенные опыты показали, что температура расплава остается неизменной в течение всего периода затвердевания отливки, если металл кристаллизуется при постоянной температуре  $T_{кр}$ , и убывает, если металл кристаллизуется в интервале температур  $\Delta T_{кр} = T_{лик} - T_{сол}$ .

Первым свойством обладает эвтектический сплав АЛ2, а вторым — сплавы АЛ3 и АЛ10. Интервальные сплавы затвердевают дольше, чем эвтектические, так как у них к теплоте кристаллизации добавляется теплота, аккумулированная в интервале  $\Delta T_{кр}$ .

Температура поверхности контакта отливки и прессформы (точнее температура поверхности прессформы) за тысячные доли секунды поднимается от начального значения  $T_{2нач}$  до значения, определяемого формулой:

$$T_{2п} = \frac{b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \text{ град.} \quad (2)$$



где 
$$a = A - \frac{b_1^2}{c_1'}; \quad b = 2AT_{кр} + A \frac{z_1}{c_1'} (n_1 + 1) - 2 \frac{b_1^2}{c_1'} T_{2нач};$$

$$c = AT_{кр}^2 + A \frac{z_1^2}{c_1'} (n_1 + 1) T_{кр} - \frac{b_1^2}{c_1'} T_{2нач}; \quad A = \frac{n_1 (n_2 + 1)}{n_2 (n_1 + 1)};$$

$n_1$  - показатель параболы, описывающей температурное поле отливки (может быть принят равным 1);  $n_2$  - показатель параболы, описывающей температурное поле формы (может быть принят равным 2);  $z_1$  - удельная теплота кристаллизации металла отливки, дж/кг;  $c_1'$  - удельная теплоемкость металла отливки в жидком состоянии, дж/(кг. град);  $b_1$  - коэффициент аккумуляции тепла материала отливки  $Вт \cdot сек^2 / (м^2 \cdot град)$ ;  $b_2$  - коэффициент аккумуляции тепла материала формы  $Вт \cdot сек^2 / (м^2 \cdot град)$ ;  $T_{кр}$  - температура кристаллизации металла или сплава. На этом уровне  $T_{2п}$  сохраняется до полного затвердевания отливки, а затем постепенно падает до первоначального значения  $T_{2нач}$ .

Температура поверхности контакта сильно зависит от начальной температуры  $T_{2нач}$  прессформы и мало изменяется с температурой  $T_{2ал}$  заливаемого металла. Малая роль температуры  $T_{2ал}$  объясняется тем, что из-за высокого коэффициента теплопередачи между расплавом и стенками камеры прессования теплота перегрева быстро отводится. В результате температура впрыскиваемого металла мало отличается от температуры  $T_{2плн}$  при любых  $T_{2ал}$ . Температура отливки в процессе затвердевания длительное время сохраняется на уровне  $T_{кр}$ . Повышение  $T_{2ал}$  над уровнем  $T_{кр}$  больше, чем на 20-30 град., практически не сказывается на величинах  $T_{2п}$  и

$$\Delta T_{2п} = T_{2п} - T_{2нач}.$$

Температура  $T_{2п}$  поверхности прессформы не зависит от конфигурации изделия. Это объясняется тем, что за время затвердевания расплава успевает прогреться лишь тонкий поверхностный слой прессформы, который в тепловом отношении не отличается от плоской стенки. Такая картина наблюдается практически при любой конфигурации изделия. Так, затвердевание отливки с толщиной стенки 6 мм длится около секунды, а на глубину 20 мм теплота проникает спустя 5 сек после начала впрыска.

Анализ кривых, полученных с помощью магнито-электрического датчика и тензометров, показывает, что скорость плунжера в начальный период мала и равна 0,12 м/сек, а усилие прессования практически не отличается от нуля. После перекрытия заливочного окна скорость плунжера резко возрастает и достигает максимального зна-

ения к моменту начала впрыска, а затем в период заполнения во всех случаях убывает до нуля по линейному закону. В расчете можно пользоваться средним значением скорости прессования.

Усилие прессования равно нулю до момента начала впрыска. После этого момента оно возрастает тоже почти по линейному закону. В конце впрыска усилие достигает максимального значения, причем удар сопровождается колебаниями давления.

Анализ температурных кривых позволяет сделать еще один вывод. Температура поверхности пресс-формы в районе питателя во всех случаях оказывается ниже таковой в районе полости формы. Разница температур составляет 10-20 град. Этот результат не есть погрешность измерений. Например, наблюдаемая разность температур могла бы возникнуть, если бы горячий спай термомпары, помещенной в питателе, оказался по высоте толще, чем спай термомпары, расположенной в отливке. Тогда термомпара питателя показывала бы заниженную температуру. Однако этот вариант исключается, так как термомпары питателя и отливки многократно менялись местами, заменялись новыми. Во всех случаях зафиксирован один и тот же результат.

Наличие наблюдаемой разницы температур можно объяснить разогревом металла при его течении с трением через узкое сечение впуска, так как работа проталкивания расплава превращается в теплоту трения. Так, на графиках зависимости температуры  $T_1$  металла в центре плоской отливки размером 50 x 80 x 6 мм от средней скорости прессования кривые температуры металла в центре отливки, заполняемой через питатель толщиной 1 мм, лежат на 10-15° выше кривых температуры отливки, заполняемой через питатель толщиной 2 мм (ширина питателя в обоих случаях одинакова). При данной скорости  $W_{\text{сп}}$  прессования скорость течения металла в питателе толщиной 1 мм вдвое больше, чем в питателе толщиной 2 мм. Одинаковость скорости  $W_{\text{сп}}$  свидетельствует об одинаковой длительности процесса охлаждения расплава при прессовании. Повышенная скорость течения металла в питателе говорит о более интенсивном выделении теплоты трения в первом случае по сравнению со вторым. Повышение температуры  $\Delta T_1$  расплава от трения в узком (щелевом) питателе может быть рассчитано по формуле:

$$\Delta T_1 = \frac{P \Delta X}{M_1 C_1} \text{ град,} \quad (3)$$

где  $P$  - среднее усилие прессования, н;  $\Delta X$  - ход прессующего втулкера за время заполнения отливки, м;  $M_1$  - масса отливки, кг;

$C'_1$  - удельная теплоемкость расплава, дж/(кг.град).

Теоретически рассчитанные значения  $\Delta T'_1$  хорошо согласуются с опытными данными.

На основании анализе экспериментальных данных можно определить минимальную скорость впуска металла в форму с учетом влияния теплового режима.

При большой общей длительности  $t_1$  заполнения полости формы время контакта расплава и прессформы может оказаться настолько большим, что слияние краев металла вокруг газового пузырька не произойдет из-за сильного охлаждения поверхностного слоя отливки. В связи с этим длительность  $t_1$  впуска надо ограничить требованием, чтобы тепловое состояние поверхностного слоя эмульсии обеспечивало эффект захлопывания пузырька.

Так как теплота перегрева быстро отводится еще в камере прессования, то в качестве критерия слияния нельзя выбрать температуру перегрева металла над уровнем  $T_{пр}$  или  $T_{лик}$ . Количество теплоты перегрева незначительно в сравнении с количеством тепла кристаллизации. Картина по существу не изменяется в связи с разогревом металла от трения. Кроме того, расплавленный металл заливается во многих случаях совсем без перегрева, в кашеобразном состоянии. В связи с изложенным в качестве критерия слияния целесообразно принять допустимое относительное количество твердой фазы, которая не мешает захлопыванию пузырька. В случае интервального сплава количество твердой фазы легко увязывается с его температурой внутри интервала  $\Delta T_{пр}$ . Температура слияния должна превышать температуру схватывания.

Формула для расчета максимально допустимой длительности  $t_{1max}$  заливки может быть получена из выражения, связывающего толщину затвердевшей корки со временем.

Имеем:

$$t_{1max} = KZ \frac{\rho'_1 Z_{эф}}{T_{пр} - T_{нач}} \text{ град.} \quad (4)$$

Здесь условная толщина твердой корки заменена произведением  $KZ$ , где  $K$  - коэффициент, говорящий о том, какая доля металла в клине радиусом  $Z$  может затвердеть без вреда для эффекта захлопывания;

$\rho'_1$  - плотность металла отливки в жидком состоянии, кг/м<sup>3</sup>;  $Z_{эф}$  - эффективная удельная теплота кристаллизации, дж/кг;  $T_{пр}$  - температура кристаллизации сплава (вместо  $T_{пр}$  можно подставлять  $T_{лик}$ ),

$T_{нач}$  - температура предварительного подогрева формы. Приведем

ная формула определяет максимально допустимую длительность заливки металла в прессформу.

При расчете по данной формуле принимаем  $k=1$ , что говорит о том, что к моменту захлопывания пузырька примерно половина жидкой фазы поверхностного слоя толщиной  $2\delta$  успевает превратиться в твердую.

Скорость  $W$  впрыска связана с объемом  $V_1$  отливки и площадью  $F$  сечения впуска соотношением:

$$V_1 = Wt, F. \quad (5)$$

Из двух последних формул получаем:

$$W_{\min} = \frac{V_1}{t_{\max} F} \quad \text{м/сек.} \quad (6)$$

Это требование лимитирует минимальную скорость впрыска, исходя из температурных условий сливания металла. Таким образом, величина  $W_{\min}$  рассчитывается дважды - на основе кинетических и температурных требований захлопывания пузырька. Из двух значений выбирается наибольшее и по нему осуществляется процесс.

По найденной скорости и гидродинамическому сопротивлению тонкого сечения впуска (железного питателя) находится требуемое  $P$  усилие прессования. Все остальные сопротивления прессформы малы в сравнении с сопротивлением питателя, поэтому в расчетах их можно не учитывать. Величина  $P$  вычисляется по формулам гидродинамики.

После впрыска металла и остановки прессующего плунжера скорость  $W_{\text{пл}}$  обращается в нуль и соответственно пропадают все гидродинамические сопротивления. С этого момента происходит непосредственная подпрессовка металла гидростатическим давлением, которое создается в полости прессового цилиндра. Без подпрессовки практически невозможно получить годное изделие: несжатая затвердевшая эмульсия имеет низкие механические свойства, плохую поверхность. Если прессующий поршень придет в мертвое положение (будет остановлен) в тот момент, когда полость прессформы занята целиком, то все поры эмульсии не будут сжаты и останутся в первоначальном состоянии. Если разрезать отливку, полученную с недопрессовкой, то очень наглядно видно распределение пористости по ее сечению. Если время заполнения формы было больше рассчитанного по формуле (4), то на поверхности хорошо видны незахлопнувшиеся поры. У отливки, с таким же временем заполнения, но полученной с подпрессовкой, поры, имеющиеся на поверхности, в разрезе практически не видны, так как под действием большого давления они сильно сжимаются и при изготовле-

нии макрошдифа затягиваются заусенцем.

У отливки, время выполнения которой меньше рассчитанного по формуле (4), пористости на поверхности не наблюдается, что подтверждено многочисленными опытами. При несоблюдении необходимых термических и гидродинамических требований механизм захлопывания не обрабатывает и на поверхности изделия образуются дефекты.

## Г Л А В А    Ш

Глава посвящена исследованию и разработке методов устранения пористости в условиях использования принципа минимального трения, который заключается в том, что питатель делается большого сечения и плавно переходит в тело отливки. Такая система имеет минимальное гидродинамическое сопротивление, поэтому усилие прессования начинает возрастать примерно с середины впрыска и достигает максимума в конце заполнения.

При заливке с минимальным трением расплав заполняет прессформу более спокойно, упорядоченно, газовые включения оказываются более крупными и редкими, они не в состоянии обеспечить чеканку контура изделий. Поэтому в данном случае необходимо обеспечить хорошую вентиляцию прессформы (компенсация усадки происходит за счет питания отливки через питатель, который затвердевает в последнюю очередь). Проблеме вентиляции посвящено большое количество исследований, но она до сегодняшнего дня не может считаться решенной до конца. В условиях минимального трения требуется удалить из полости формы весь воздух, продукты сгорания смолки и т.д., но часто имеющихся вентиляционных каналов недостаточно, чтобы справиться с такой задачей. Поэтому в работе предложено использовать для вентиляции игольчатые вставки, представляющие собой пакеты стальных отрезков проволоки (иголок) диаметром 0,2-0,6 мм. Эти пакеты хорошо пропускают воздух, но не пропускают расплавленный металл, так как размер щелей между иголками не превышает 0,1 мм. Иголки должны быть плотно упакованы, чтобы не сдвинулись под действием давления прессования. Их удобнее всего набивать в обойму, которая вставляется в соответствующее гнездо прессформы. Под вставкой должна быть предусмотрена прокладка с отверстиями для выхода газа в атмосферу.

Были разработаны различные способы набивки иголок в обойму. Согласно первому способу, иголки большей длины, чем надо, набиваются в цилиндрическую часть отверстия специальной матрицы. Цилин-

дрического отверстия переходит в коническое, причем малый диаметр конуса сделан чуть меньше обоймы, в которую набиваются иглоки. Матрица устанавливается на обойму и иглоки запрессовываются в последнюю с помощью штока. Лишняя проволока срезается отрезным камнем, а торцы обоймы шлифуются. Недостатками этого способа являются повышенный расход проволоки и засорение вентиляционных каналов частицами абразива.

Согласно второму способу, иглоки нужной длины, равной высоте обоймы, набираются в цилиндрическую часть отверстия матрицы и затем постепенно запрессовываются несколькими штоками различного (уменьшающегося) диаметра. Первый шток пригнан по большому диаметру отверстия матрицы, а последний - по малому. Разность диаметров двух последовательных штоков не должна превышать диаметра иглоки. После запрессовки торцы иглок на рабочей поверхности пакета зачищаются наждачной бумагой.

Иглоки также можно закреплять в пакете с помощью клиньев, имеющих бо́льший диаметр, чем сами иглоки. При этом конический участок клина не должен превышать половины длины иглоки.

Попытки изготовить вставку в разъемной обойме не увенчались успехом: с помощью стяжных винтов невозможно достичь требуемого объема иглок.

Для хорошей работы пакет иглок обжимается на 12-18% по сравнению с первоначальной площадью поперечного сечения набранного пакета. Пористость готовой игольчатой вставки колеблется в пределах 9,2-21,4%. Оптимальная высота вставки равна 10 мм. Иглоки изготавливаются из пружинной проволоки марки 65Г, имеющей в остоянии поставки достаточную твердость, на каких-либо автоматах, например, на автомате для холодной высадки мелких болтов.

Плотность упаковки иглок в пакете может быть различной. Самая плотная упаковка получается, если в сечении вставок оси соседних иглок совпадают с вершинами равностороннего треугольника, а самая неплотная - с вершинами квадрата.

При плотной упаковке диаметр окружности, которую можно вписать между иглоками, равен  $0,16 \sqrt{D_{иг}}$ , при неплотной -  $0,42 \sqrt{D_{иг}}$ , где  $\sqrt{D_{иг}}$  - диаметр иглок. Следовательно, при  $\sqrt{D_{иг}} = 0,2$  мм зазоры соответственно равны 0,03 и 0,08 мм, а при  $\sqrt{D_{иг}} = 0,4$  мм - 0,06 и 0,17 мм, и при  $\sqrt{D_{иг}} = 0,6$  мм - 0,1 и 0,24 мм. На практике обычно получается более плотная упаковка, когда оси иглок располагаются по вершинам треугольника. Это значит, что для вентиляции

прессформы допустимо применять иголки перечисленных выше диаметров - 0,2, 0,4 и 0,6 мм, ибо в зазоры до 0,1 мм жидкий металл не заливается. Однако при небрежной упаковке иголок диаметром 0,6 мм могут образоваться зазоры 0,24 мм. В этом случае вставка выйдет из строя вследствие закупорки капилляров расплавом.

Для успешной эксплуатации иголячатой вентиляционной вставки важно уметь обеспечить некоторую первоначальную газопроницаемость пакета, а затем сохранить эту газопроницаемость на определенном минимальном уровне в процессе работы вставки. С этой целью было проведено обширное экспериментальное и теоретическое исследование газопроницаемости новых вставок, а также вставок, находящихся в эксплуатации, и было установлено влияние различных факторов на величину коэффициента газопроницаемости.

Теоретическое значение коэффициента газопроницаемости  $K_r$  может быть найдено по формулам, полученным исходя из условия ламинарного течения газа в капиллярах вставки. Для случая наиболее плотной упаковки иголок коэффициент газопроницаемости равен:

$$K_r = 20 \rho_{\text{иг}}^2 M^3 / (n \cdot \text{сек}). \quad (7)$$

Для экспериментального определения коэффициента газопроницаемости вставок используется стандартный прибор, который обычно применяется в детских лабораториях при измерении газопроницаемости формовочных смесей. Был изготовлен специальный переходник-гильза, в которой с помощью гайки и резиновой прокладки закрепляется испытуемая вставка.

Опыты показывают, что коэффициент газопроницаемости, полученный экспериментально, примерно соответствует его теоретическому значению, которое найдено по формуле (7). Теоретически величина

$K_r$  пропорциональна диаметру иголки в квадрате, практически работа получается несколько более высокого порядка за-за влияния заусенцев на торцах иголок и т.д. С увеличением длины иголок газопроницаемость падает.

Во всех случаях газопроницаемость иголячатой вставки, выше, чем средняя газопроницаемость сырой песчано-глинистой формы, равная  $1,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4 / (\text{н.сек.})$ . Например, при диаметре иголок 0,4 мм вставка, изготовленная по первому способу со шлифованием торцов, имеет коэффициент газопроницаемости  $K_r$ , равный  $1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4 / (\text{н.сек.})$ , а вставка, изготовленная без шлифования, - коэффициент  $K_r = 1,7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4 / (\text{н.сек.})$ . Для вставки с иголками 0,6 мм соответ-

отсутствие значения величин равны 2,1 и  $4,5 \cdot 10^{-6}$  м<sup>4</sup>/(н.сек). Отсюда следует, что шлифование торцов уменьшает газопроницаемость вставки примерно в 1,5-2 раза из-за появления звуенцев на иглоках и засорения капилляров частицами абразива. При необходимости шлифовать торцы это надо делать с минимальной подачей.

По известному коэффициенту газопроницаемости, исходя из ~~на~~ на ламинарной фильтрации Дарси, можно рассчитать требуемую площадь игольчатой вставки.

$$F = \frac{\Delta V \Delta \ell}{K_r \Delta P \Delta t} \text{ м}^2, \quad (8)$$

где  $\Delta V$  - объем газа, перегоняемого через вставку ( $\Delta V$  равен объему отливки и литниковой системы) м<sup>3</sup>;  $\Delta \ell$  - высота вставки, м;  $\Delta P$  - перепад давления по обе стороны вставки, н/м<sup>2</sup>;  $\Delta t$  - время заполнения формы, сек;  $K_r$  - коэффициент газопроницаемости, м<sup>4</sup>/(н.сек).

Расчет этот является не совсем точным, так как за время заполнения давление газов в форме изменяется. Однако по опытным данным оно не превышает 2-3 бар.

Расчитанная площадь будет минимальной и в процессе работы недостаточной, так как поры вставки постепенно засоряются и теряют первоначальную газопроницаемость. В связи с этим было исследовано изменение газопроницаемости игольчатых вставок в процессе работы.

Были испытаны вставки с диаметром иголок от 0,2 до 1 мм. Заливался сплав АЛ2 при  $T_{\text{зап}} = 913^{\circ}\text{К}$ . Форма смазывалась техническим вазелином. После 5 запрессовок газопроницаемость накетов с иглоками 0,2 и 0,4 мм упала примерно на 10%. Вставки с иглоками 0,6 мм потеряли 30% газопроницаемости после 5 запрессовок. Иголки 0,8 мм дали падение газопроницаемости на 50% после 5 запрессовок и на 80% после 50. Вставки с иглоками 1 мм полностью потеряли газопроницаемость после 5 запрессовок.

Разборка вставок показала, что иголки диаметром 0,2 и 0,4 мм покрыты смазкой, но проникновения расплава в капилляры не наблюдается. Между иглоками 0,6 мм в местах с менее плотной упаковкой имеются отдельные включения затвердевшего металла. Число включений больше у иголок 0,8 мм. во вставке с иглоками 1 мм все капилляры закупорены расплавом.

На основе проведенного предварительного исследования было установлено, что для практических целей целесообразно пользоваться



Вентиляционными вставками с иглками диаметром 0,4–0,6 мм. Иголочки 0,2 мм дают пониженную газопроницаемость. Кроме того, они неудобны в обращении.

Дальнейшие исследования проведены с отливками коробчатого типа, имеющими толщину стенки 2 и 6 мм. Сплав АМ2 перед заливкой рафинируется хлористым цинком непосредственно в тигле электропечи сопротивления. Прессформа из стали 3Х2В8Ф смазывается техническим воском или техническим вазелином. Температуры:  $T_{\text{мет}} = 600-620^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\text{мет}} = 150^{\circ}\text{C}$ . Баковой питатель имеет толщину, равную толщине стенки отливки. Форма заполняется сравнительно опоспешно, газ вытесняется в направлении, где установлена вентиляционная вставка диаметром  $d = 15$  мм. При расчете вставки коэффициент запаса  $K$  принят равным 3.

Из опытных данных видно, что газопроницаемость вставки с иглками 0,6 мм при смазке формы техническим воском очень быстро падает в начальный период, но все время остается выше газопроницаемости вставки с иглками 0,4 мм. После 500 запрессовок обе вставки практически перестают вентилировать форму. Это объясняется тем, что технический воск плохо выгорает и капилляры вставки засорятся остатками смазки.

При смазке прессформы техническим вазелином газопроницаемость вставки уменьшается значительно медленнее, чем при смазке формы техническим воском.

Зависимость газонасыщенности отливки от газопроницаемости вентиляционной вставки наглядно выявляет действенность эффекта вентиляции. О газонасыщенности можно судить по плотности изделия. Плотность определяется методом гидростатического взвешивания. Перед взвешиванием отливка в течение 30 минут выдерживается в цинфельной печи при температуре  $500^{\circ}\text{C}$ . При этой температуре алюминиевые сплавы имеют очень низкую прочность и под действием газа, скачкообразно в порах, раздуваются. Таким способом удается проверить газотоннажность отливок, полученных при разных давлениях запрессовки, к общему давлению и сделать результаты опытов сравнимыми.

Например, при вентиляции формы для получения детали коробчатого типа с толщиной стенки 2 мм из сплава АМ2 была применена вентиляционная вставка с диаметром 15 мм. Она изготовлена из иглолок диаметром 0,4 мм и длиной 10 мм, коэффициент запаса  $K = 3$ . Вставка перед каждой заливкой продувается сжатым воздухом, а прессформа смазывается техническим вазелином. Температуры:  $T_{\text{мет}} =$

$\approx 600-620^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\text{лиж}} = 150^{\circ}\text{C}$ . Из анализа опытных данных видно, что газонасыщенность этого изделия крайне мала ( $\rho_{\text{гем}} = 2655 \text{ кг/м}^3$ ) и сохраняется неизменной вплоть до 900-1000 заливок, после чего начинает постепенно снижаться в связи с уменьшением газопроницаемости вставки. Средняя плотность при отсутствии вентиляционной вставки составляет всего  $2191 \text{ кг/м}^3$  (плотность эталонного образца, рассчитанная теоретически по составу и плотности компонентов равна  $2678 \text{ кг/м}^3$ ).

Если при расчете вставки коэффициент запаса принять больше 3, тогда после 1000 заливок плотность изделия будет оставаться неизменной. Однако делать большую вставку иногда не позволяют габариты изделия и конструкция прессформы. В этих случаях вставку можно заменять после каждой 1000 заливок. Экономически это себя оправдывает.

#### Г Л А В А IV

В четвертой главе рассматривается производственное испытание игольчатых вставок. Необходимо отметить, что в принципе вентиляция обязательна во всех случаях - при заполнении прессформы как с минимальным, так и с максимальным трением. Однако при максимальном трении некоторое количество газа может оставаться в изделии, оно там играет положительную роль. В случае минимального трения желательно весь газ удалить из прессформы при ее заливке.

Опыты с отливками коробчатого типа проводились при впрыске металла с максимальным и минимальным трением. Если вентиляция неудовлетворительная, то в случае минимального трения газовые включения небольших размеров рассредотачиваются по всему объему отливки. При заполнении прессформы с минимальным трением газовые включения получаются более крупными. Они сосредоточены главным образом в верхней части отливки.

Сочетание принципа минимального трения с применением вентиляционных вставок позволяет получить плотную отливку без газовых пор. Такая отливка после 30-минутной выдержки в печи при температуре  $500^{\circ}\text{C}$  не вспучивается. Это свидетельствует о том, что вентиляционные вставки успешно справляются со своей ролью.

На Минском моторном заводе нормы усилителя выключения сцепления изготавливаются из сплава АЛ4 в нестиместной прессформе. Три гнезда были снабжены кольцевыми вентиляционными вставками. Применялись иголки диаметром 0,2; 0,4; 0,6 мм. Покеты уплотнены с

Вставка иглок - клинчат диаметром 1 мм. Под вставками расположены кольца с отверстиями, которые соединяют полость прессформы с охлаждающей средой.

Эксплуатация прессформы показала, что после 2500 запрессовок вставки оставались неповрежденными. Газопроницаемость вставок уменьшилась незначительно, так как при литье периодической смазки подвергались только стержни. Исключение составляли вставки с иглками диаметром 0,6 мм: поры этой вставки быстро залились металлом и вентиляция прекратилась. Это объясняется сильным разогревом прессформы во время работы машины, вследствие чего расплав приобретает способность затекать в зазоры размером 0,1 мм.

Применение описанных вставок с диаметром иглок 0,2 и 0,4 мм позволило резко уменьшить количество газовых включений и снизить брак изделий с 18,4 до 8,2%. Брак выявляется при механической обработке литья, на котором протачивается канавка для кольца. При проточке открывается пористость. Экономический эффект от снижения брака составляет 196 рублей на тонну литья. Брак полностью ликвидирован не был, так как на заводе литейная система прессформы спрессована без учета использования вентиляционных вставок, то есть с таким сечением впуска.

## В ы в о д ы

1. В работе с позиций тепловой теории литья впервые теоретически и экспериментально исследованы процессы формирования поверхности отливки в условиях использования принципа максимального трения и процесс вентиляции форм в условиях использования принципа минимального трения при литье под давлением. На основе результатов исследования разработаны мероприятия по улучшению поверхности и снижению пористости изделия.

2. На основе теоретического анализа процесса заполнения форм с максимальным трением (литатель имеет такое сечение впуска), исследован механизм образования плотной корки на поверхности отливки. Показано, что пористость на поверхности отливки отсутствует, если успевает сработать механизм захлопывания пузырька газа, для чего скорость впуска металла должна превышать определенный предел (например, при толщине корки, равной 0,01 мм, для отливки из алюминиевого сплава скорость должна превышать 6,5 м/сек, для отливки из цинкового сплава - 4,8 м/сек) и отделение капли и струйки металла не должно происходить ниже температуры скрепления. Из анализа опытных данных установлено, что при любой температуре

валишки металла поступает в полость формы практически без перегрева. В качестве предельной температуры схватывания принята температура, при которой в жидком металле содержится 50% жидкой фазы. Получена формула для определения максимально допустимого времени впуска, зная которое можно выполнить необходимые технологические расчеты. Расхождение расчетов по полученной формуле с экспериментальными данными не превышает 10%.

3. На основании исследования заполнения формы в соответствии с принципом минимального трения (питатель плавно переходит в тело отливки) предложено вентилировать форму посредством игольчатых вставок, представляющих собой пакеты отрезков проволоки диаметром 0,4-0,6 мм, что позволяет получать отливки, которые можно подвергать термообработке.

4. Разработаны способы изготовления игольчатых вставок. Показано, что во всех случаях необходимо давать пакету иголок облатке, равное 10-15%, во избежание разрушения вставок при эвакуации. При этом пористость вставки составляет 9,2%. Наиболее рационально изготавливать вставки из иголок длиной 10 мм.

5. На основании теоретического анализа установлено, что газопроницаемость игольчатых вставок пропорциональна квадрату диаметра иглоки. Механическая обработка торцов снижает газопроницаемость. Так, вставки, полученные запрессовкой иголок одинаковой длины диаметром 0,4 мм в оболочку с последующей зачисткой торцов наждачной бумагой, имеют газопроницаемость  $1,7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4/(\text{н.сек.})$ , а вставки, полученные из иголок неодинаковой длины с последующей шлифовкой торцов, -  $1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4/(\text{н.сек.})$  (газопроницаемость сырой формовочной смеси равна  $1,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4/(\text{н.сек.})$ ).

6. В результате исследования влияния смазки на изменение газопроницаемости вставок установлено, что наименьшая потеря газопроницаемости наблюдается при смазке формы техническим вазелином. Во всех случаях после 500 запрессовок вставка теряет способность вентилировать форму. Продувка ее с тыльной стороны перед каждой запрессовкой сухим воздухом увеличивает срок службы в 2 раза.

7. Научено изменение плотности литья в зависимости от числа запрессовок (вставка рассчитана с коэффициентом зауса  $n=3$ ). Плотность отливок, полученных в форме с игольчатой вставкой и выдержанных в печи при температуре  $500^{\circ}\text{C}$  приближается к плотности эталонного образца (плотность эталонного образца  $\rho_{\text{эт}} = 2678 \text{ кг/м}^3$ , плотность отливок  $\rho_{\text{отп}} = 2655 \text{ кг/м}^3$ ) и значительно выше плотнос-

ть отливок, полученных в форме без игольчатых вставок ( $\rho = 2191 \text{ кг/м}^3$ ). Высокая плотность сохраняется до 1000 запрессовок.

8. Применение игольчатых вставок в производственных условиях в цехе алюминиевого литья Минского моторного завода при отливке поршня усилителя выключения сцепления снизило брак с 19,4 до 8,2%, что уменьшило себестоимость тонны литья на 196 рублей.

Основные разделы диссертации опубликованы в следующих работах:

1. И.К.И г н а т и к. Применение игольчатых вставок в прессформах литья под давлением. В сб. Охлаждение отливки. Минск, изд-во "Наука и техника", 1969.

2. И.К.И г н а т и к. Устранение дефектов поверхности и снижение пористости отливок при литье под давлением. В сб. Вопросы прочности и пластичности металлов. Минск, изд-во "Наука и техника", 1970.

3. А.И.В е я н и к, И.К.И г н а т и к. Улучшение качества поверхности и снижение пористости отливок при литье под давлением. В сб. Повышение качества и надежности литых изделий. Свердловск, 1971.

Основные результаты доложены и обсуждены:

1. На XXIV, XXV, XXVI, XXVII научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава Белорусского ордена Трудового Красного Знамени политехнического института совместно с работниками промышленности и строительства (Минск, 1968, 1969, 1970, 1971 г.г.).

2. На областной научно-практической конференции "Повышение качества отливок" (Нижний Тагил, 1970 г.).

3. На У-ой научной конференции молодых ученых АН БССР (Минск, 1970 г.).