

УДК 621.746:669.715

Ф. М. Котлярский

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

О ФАКТОРАХ ФОРМИРОВАНИЯ БЕСПРИБЫЛЬНЫХ ОТЛИВОК ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Рассмотрены механизмы формирования газоусадочных дефектов в отливках из необработанных и газонасыщенных алюминиевых сплавов в зависимости от интенсивности теплоотвода и величины давления, воздействующего на затвердевающую отливку. Установлены факторы и технологические параметры, благоприятствующие получению герметичных бесприбыльных отливок.

Ключевые слова: бесприбыльные отливки, газоусадочные дефекты, алюминиевые сплавы.

Розглянуто механізми формування газоусадочних дефектів в виливках з необроблених та газонасичених алюмінієвих сплавів в залежності від інтенсивності тепловідведення та величини тиску, діючого на тверднучий виливок. Встановлено чинники та технологічні параметри, які сприяють одержанню герметичних безнадливних виливків.

Ключові слова: безнадливні виливки, газоусадочні дефекти, алюмінієві сплави.

The formation mechanisms of gas-shrinkage defects in untreated and gas-saturated aluminum alloys castings have been examined according to heat removal intensity and pressure that influence upon hardening casting. Factors and technological parameters that help to obtain leak-proof non riser castings have been established.

Keywords: non-riser casting, gas-shrinkage defects, aluminum alloys.

Наиболее распространенным методом компенсации усадки затвердевания отливок является использование прибылей, на которые при литье алюминиевых сплавов расходуется до 40-50 % жидкого металла, тогда как объем усадки затвердевания составляет обычно 4-6 %. Сокращение разницы между расходуемым (40-50 %) и требуемым для питания отливки расплавом (4-6 %) является огромным резервом ресурсосбережения.

В данной работе ставилась задача разобраться в механизмах влияния режимов наводороживания расплава и теплосиловых условий затвердевания на характер газоусадочных процессов и формирование бесприбыльных отливок.

Известно [1], что одну и ту же отливку (например, цилиндр) без специальной прибыльной надставки при высокой интенсивности затвердевания можно рассмат-

Новые методы и прогрессивные технологии литья

ривать как обычную, в которой верхняя часть выполняет роль прибыли с соответствующей открытой раковинной и цепочкой усадочных дефектов, а нижняя получается плотной (рис. 1, а, справа), тогда как при низкой интенсивности затвердевания в ряде случаев вся отливка уподобляется непропитываемому металлоемкому узлу, в котором компенсация усадки затвердевания (полная или частичная) осуществляется за счет утяжки и пузырьков выделяющегося из расплава водорода (рис. 1, а, слева). Естественно, что и механизмы формирования газоусадочных дефектов в таких отливках будут разными. И начинаются эти различия с возможности или невозможности образования на открытой поверхности отливки плотной корочки затвердевшего металла, достаточно прочной для сопротивления воздействию атмосферного давления (перепаду внешнего и внутреннего давлений).

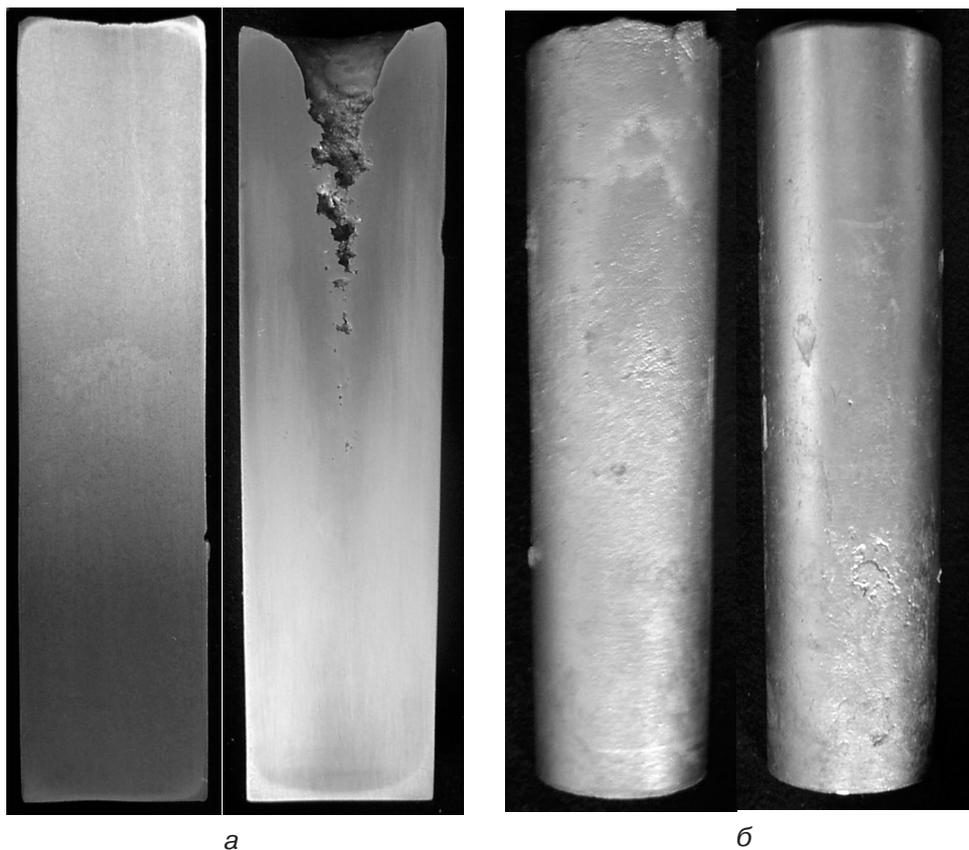


Рис.1. Сечения (а) и внешний вид (б) силуминовых цилиндрических отливок, полученных в условиях низкой (слева) и высокой (справа) интенсивности затвердевания

Этот вопрос частично рассмотрен в работах [2, 3]. Методика исследований представлена на рис. 2. Металлическая форма выполнена в виде усеченного конуса, расширяющегося снизу вверх под углом 3° . Верхняя толстостенная часть формы, теплоизолированная снаружи, предназначена для формирования избыточной части отливки высотой 70-80 мм, а нижняя тонкостенная – для создания металлостатического напора 0,004 МПа (аналогично условиям работы прибыли для отливок мелкой и среднего развесов). В крышке, плотно прикрывающей форму сверху, сделали два канала, через один из которых полость формы может сообщаться либо с атмосферой, либо с источником сжатого воздуха, а через другой – с манометром. Собранный форма при комнатной температуре погружается в тигель с расплавом на глубину, при которой зеркало металла устанавливается несколько ниже (на 4-5 мм) уровня верхнего торца формы. После истечения задан-

ного времени форму приподнимают над уровнем расплава с целью создания металлостатического напора либо извлекают полностью, если в эксперименте планируют над прибылью создать избыточное газовое давление. В последнем случае выдавленная масса металла собирается на подложке и взвешивается. В процессе каждого опыта фиксируются время извлечения формы из тигля, а также величина и время подачи давления.

Продолжительность полного затвердевания сечения образца в верхней части формы для доэвтектического сплава (Al + 6,4 % Si) при исходной температуре в тигле 700 °С составляла в среднем 85 с, а для сплава, близкого по составу к эвтектическому (Al + 11,5 % Si) при начальной температуре 660 °С, – 105 с.

В первой серии опытов, выполненных на эвтектическом сплаве Al+11,5 % Si, исследовали действие на прибыль металлостатического напора до 0,004 МПа, создаваемого путем подъема формы над уровнем расплава таким образом, чтобы ее нижний торец оставался погруженным.

Результаты этих исследований представлены на рис. 3 (верхний ряд). Как видно, на протяжении 30 с после начала охлаждения жидкий металл выливается из центральной части прибыли, что свидетельствует о возможности свободного питания. Затем по всему сечению незатвердевшей части образуется твердожидкая масса. Под действием металлостатического напора верхний уровень этой смеси опускается вниз, тогда как нижний, судя по конфигурации его поверхности, остается практически на месте, то есть параллельно протекают два процесса: жидкая фаза частично вытесняется (путем фильтрации) из объема прибыли и увлекает при этом (с помощью капиллярных сил и окисной пленки) верхний слой кристаллического каркаса, уплотняя его. Так как прочность каркаса в процессе уплотнения возрастает, то после опускания до определенного уровня, в зависимости от величины напора, движение верхнего слоя прекращается. В последующих стадиях затвердевания прибыли высота воронок, образующихся под действием того же напора, уменьшается, что можно объяснить не столько увеличением удельной прочности твердожидкой массы (в процессе кристаллизации эвтектики кристаллический каркас практически не изменяется), сколько сокращением занимаемой ею площади.

Рассматривая поверхностный слой незатвердевшей части цилиндрической прибыли как защемленный по краям диск (радиусом R и толщиной ϵ) с равномерно распределенной нагрузкой, определяемой напором P , величину срезающих усилий можно выразить зависимостью

$$\sigma = \frac{P \cdot S}{\Pi \cdot \epsilon} = \frac{P \cdot R}{2\epsilon},$$

где $S = \pi R^2$ – площадь круга; $\Pi = 2\pi R$ – периметр круга.

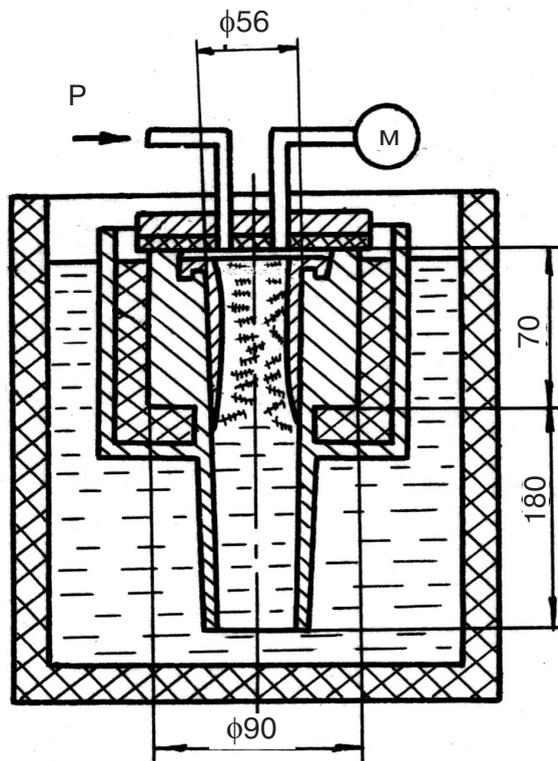


Рис. 2. Схема устройства для исследования влияния поверхностных явлений на процесс питания отливки

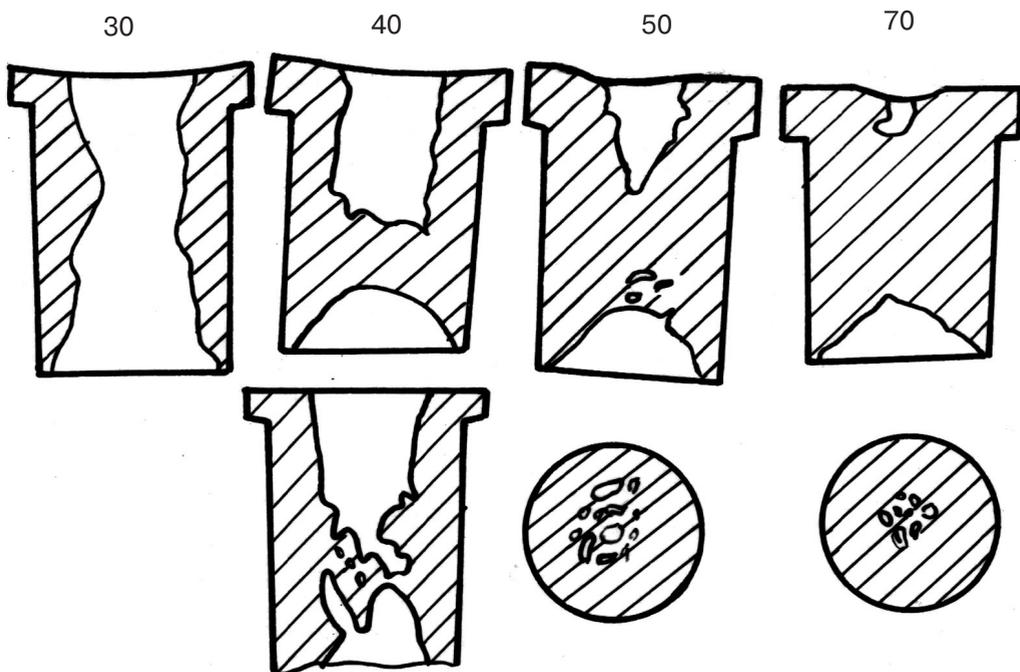


Рис. 3. Продольные и поперечные сечения образцов из сплава Al+11,5 % Si, полученных в условиях воздействия металлостатического напора 0,004 МПа (верхний ряд) и критического газового давления (нижний ряд) на различных стадиях затвердевания (цифрами указано время извлечения формы из расплава, в с)

Отсюда $P_{кр} = \frac{2\sigma}{R}$ или, подставляя критические значения $P_{кр}$ и $\sigma_{кр}$,

$$P_{кр} = \frac{2\sigma_{кр}}{R}. \quad (1)$$

Из выражения (1) видно, что с уменьшением радиуса твердожидкой зоны величина критического напора, необходимого для преодоления сопротивления поверхностного слоя, при прочих равных условиях должна увеличиваться. Поскольку же в рассматриваемой серии экспериментов напор оставался постоянным, то по мере затвердевания остановка поверхностного слоя происходила при меньшей степени уплотнения кристаллического каркаса, то есть на более высоком уровне опытного образца. Часть образца, расположенная ниже воронки, во всех случаях, независимо от времени создания металлического напора, была плотной по всему сечению.

Наложение избыточного газового давления на различных стадиях затвердевания (через 10 с после извлечения формы из тигля) не оказывало существенного влияния на объем и конфигурацию воронки, но приводило к образованию каналов переменного сечения в нижней части образца (рис. 3, нижний ряд).

Причиной образования этих каналов является неравномерная по объему прочность твердожидкой массы. После «заклинивания» опускающегося поверхностного слоя в наиболее слабых местах образуются разрывы, через которые перепад давлений смещается в нижние слои металла, продолжая разрушительный процесс. В этот период прибыль работает неэффективно, так как в качестве питающего материала используется лишь незначительная часть жидкой фазы, равная объему образующихся пустот. Большая же часть незатвердевшего металла прибыли удерживается в порах кристаллического каркаса и в питании отливки не участвует.

Величина давления, необходимого для разрушения поверхностного слоя и обра-

Таблица 1. Величина критического давления, необходимого для образования в прибыли сквозных каналов (в скобках расчетные значения)

Номер позиции	Время извлечения формы из тигля, с	Время создания давления, с	Величина давления, МПа	Масса вытесненного металла, г
		Al + 11,5 % Si		
1	40	50	0,015 (0,024)	11,6
2	50	60	0,02 (0,027)	20,5
3	60	70	0,03 (0,031)	21,2
4	70	80	0,04 (0,037)	16,7
5	80	90	0,055 (0,048)	10
6	90	100	0,082 (0,084)	-
		Al + 6,4 % Si		
7	15	25	0,07	-
8	17	27	0,08	20
9	20	30	0,08*	13,6
10	20	30	0,2	25,3
11	20	30	0,28	33,5
12	25	34	0,2*	6
13	25	34	0,225*	21,6
14	25	34	0,25	21,4
15	25	34	0,34	28
16	30	39	0,26**	26,7
17	30	39	0,3	38,6
18	35	44	0,4**	27,1

* сквозные каналы отсутствуют, образуются местные трещины

** слабое просачивание воздуха, в некоторых поперечных сечениях толщина канала не превышает 0,1 мм

зование сквозных каналов по высоте прибыли, зависит от стадии ее затвердевания (табл. 1), то есть от размеров и состояния твердожидкой зоны.

Так как в выражении (1) радиус R является функцией продолжительности охлаждения металла в форме, то, воспользовавшись законом квадратного корня применительно к цилиндру, можно произвести следующие преобразования:

$$S_{\text{тж}} = \pi R^2 = S - S_{\text{т}} = \pi R_0^2 - K_3 \sqrt{\tau},$$

где $S_{\text{тж}}$ – площадь сечения твердожидкой зоны; $S_{\text{т}} = K_3 \sqrt{\tau}$ – площадь сечения твердого слоя; $S = \pi R_0^2$ – площадь сечения прибыли; R_0 – радиус прибыли; K_3 – коэффициент затвердевания (для рассматриваемых условий при общей продолжительности затвердевания 105 с $K_3 = \frac{24,6}{\sqrt{105}} = 2,4 \text{ см}^2 \text{ с}^{-1/2}$); где τ – время от начала затвердевания.

Так как в данном случае рассматривается сплав, близкий по составу к эвтектическому, то сделали допущение, что практически вся твердая фаза сосредоточена в наружном слое полностью затвердевшего металла

$$R = \sqrt{R_0^2 - \frac{K_3}{\pi} \sqrt{\tau}}$$

или, используя численные значения R_0 , K_3 и π ,

$$R = 0,87\sqrt{10,25 - \sqrt{\tau}}.$$

Подставляя полученную зависимость в выражение (1), получим

$$P_{кр} = \frac{2\theta \sigma_{кр}}{0,87\sqrt{10,25 - \sqrt{\tau}}}.$$

Полагая, что параметры θ и $\sigma_{кр}$ постоянны, и, заменив выражение $\frac{2\theta \cdot \sigma_{кр}}{0,87}$ константой K_1 , получим

$$P_{кр} = \frac{K_1}{\sqrt{10,25 - \sqrt{\tau}}}.$$

Путем подстановки экспериментальных значений $P_{кр}$ определяем среднюю величину $K_1 = 0,042$.

В конечном виде

$$P_{кр} = \frac{0,042}{\sqrt{10,25 - \sqrt{\tau}}}. \quad (2)$$

Удовлетворительное согласование между данными, рассчитанными с помощью выражения (2), и распределением опытных значений $P_{кр}$ (см. табл. 1) является дополнительным аргументом в пользу влияния размеров твердожидкой области на величину критического давления, необходимого для обеспечения питания отливки твердожидкой прибылью даже в том случае, если по ходу затвердевания кристаллический каркас не претерпевает существенных изменений.

С другой стороны, результаты выполненных расчетов и экспериментальных исследований говорят о том, что при одном и том же давлении сдвиговые напряжения линейно возрастают с увеличением радиуса зоны твердожидкого состояния. Деформация сдвига произойдет на таком расстоянии от оси, где срезающие усилия превысят прочность кристаллического каркаса. Поэтому усадочная воронка в процессе ее формирования зачастую вначале сужается (пока опускающийся металл пребывает в жидком или жидкотвердом состоянии), а с переходом в твердожидкое состояние начинает расширяться (рис. 4).

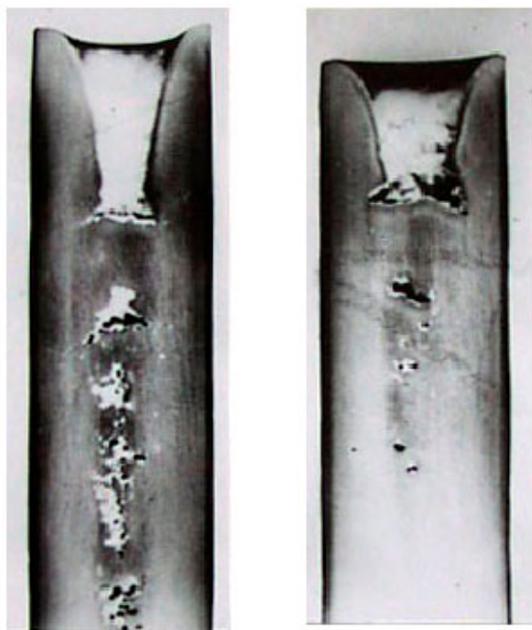


Рис. 4. Прибыльные части цилиндрических отливок диаметром 50 мм и высотой 400 мм из сплава Al + 6 % Si (слева) и Al + 11,5 % Si (справа)

Аналогичный принцип действия прибыли с открытой кристаллизующейся поверхностью подтверждается также результатами исследования

дозвтектического сплава. Однако, имеются и некоторые особенности, связанные с изменением кинетики образования и структуры кристаллического каркаса.

Во-первых, значительно сокращается время образования по всему сечению прибыли твердожидкой массы, способной выдержать металлостатический напор 0,004 МПа. Для сплава Al + 6,4 % Si оно составляет 16-17 с.

Во-вторых, из-за сравнительно высокой прочности каркаса, обусловленной повышенной концентрацией твердой фазы при дендритном строении первичных кристаллов, примерно после 22-24 с затвердевания действие металлостатического напора, судя по конфигурации поверхности прибыли, практически не ощущается. Небольшая воронка в центральной части формируется под действием усадочных напряжений еще до подъема формы над расплавом.

В-третьих, значительно повышается величина критического давления (см. табл. 1). Вначале этот параметр фиксировали, как и при исследовании эвтектического сплава, в момент появления течи воздуха в процессе плавного роста давления. Затем использовали другую методику, согласно которой в заданный момент времени давление резко повышалось до определенной величины и поддерживалось постоянным до окончания затвердевания образца. В случае отсутствия течи воздуха в следующем опыте величина давления увеличивалась. Сравнение данных обеих методик показало, что в первом случае значения $P_{кр}$ получаются завышенными на 20-25 %, поэтому в дальнейшем использовали только вторую методику.

Анализ образцов, претерпевших воздействие газового давления, показывает, что в доэвтектическом сплаве (в отличие от эвтектического) образуются не колонии каналов, сконцентрированных в центральной зоне, а преимущественно трещины, разветвляющиеся по всему сечению. В верхней части образца (возле воронки) ширина трещин достигает 2-3 мм. По мере опускания вниз трещины сужаются и в ряде сечений становятся незаметными при визуальном осмотре шлифа, но могут быть обнаружены путем деформации сжатия. Через эти трещины давление передается нижним слоям металла и при недостаточной прочности затвердевшей корочки может произойти разрыв образца. Обычно такого рода расслоения в поперечном сечении наблюдались на участках, расположенных в зоне перехода толстостенной части формы в тонкостенную при наложении давления, равного критическому или больше его.

Так как объем наблюдаемых трещин незначительный по сравнению с количеством выдавливаемого расплава (см. табл. 1), следует предположить, что основная масса питающей фазы поступает за счет деформации открытой поверхности прибыли. Из таблицы видно, что вытеснение расплава наблюдается и при давлении ниже критического, когда прибыль не разрушается, однако с повышением давления количество вытесненного расплава несколько увеличивается.

Обращают на себя внимание высокие значения критического давления, которое даже на ранних стадиях затвердевания сплава Al + 6,4 % Si достигает 0,4 МПа. Может сложиться впечатление, что после перехода прибыли в твердожидкое состояние питание отливок из такого сплава при атмосферном давлении окажется недостаточным из-за нехватки сил для деформации и разрушения верхних слоев прибыли. Однако опыт литья из доэвтектического сплава цилиндров диаметром 50 мм и высотой 400 мм в неокрашенном массивном кокиле без прибыльной надставки свидетельствует о том, что и в атмосферных условиях нижняя часть отливки высотой примерно 120 мм получается плотной, а в верхней части образуются сообщающиеся между собой пустоты в виде трещин и каналов переменного сечения, что подтверждается проникновением в эти каналы и трещины солевого расплава (50 % NaNO_3 + 50 % KNO_3), залитого в усадочную воронку на начальной стадии ее формирования [4]. Следовательно, и при отсутствии избыточного давления имелись силы, достаточные для деформации и разрушения верхних участков цилиндра вплоть до окончания его затвердевания. Можно предположить, что недостаток внешнего силового воздействия компенсируется внутренним отрицательным давлением,

возникающим вследствие усадки, причем для очищенного от неметаллических включений расплава величина отрицательного давления может быть эквивалентна нескольким атмосферам [2].

Следует учитывать и тот факт, что в реальных условиях затвердевания питающий расплав непрерывно перемещается относительно отливки и перемешивается, что препятствует образованию прочного кристаллического каркаса и его сцеплению с твердой массой отливки, причем чем больше скорость относительного перемещения (СОП), тем сильнее эффект препятствования. Вероятно, эта скорость и является главным фактором возможности или невозможности образования на открытой поверхности отливки плотной затвердевшей корочки, не поддающейся разрушению под действием перепада внешних и внутренних давлений и препятствующей проникновению воздуха внутрь отливки. В то же время СОП является функцией трех взаимодействующих между собой аргументов: интенсивности затвердевания, газовой выделенности из расплава и силовых условий образования утяжин.

Для необработанного расплава при очень высокой интенсивности затвердевания на снятие перегрева и кристаллизацию открытого поверхностного слоя за счет теплоизлучения просто не хватит времени. Зона твердожидкого состояния окажется узкой, газа выделится немного, утяжин не будет, СОП, определяемая усадкой затвердевания, максимальная. Отливка с четко выраженным металлическим блеском боковой поверхности (см. рис.1, б, справа) разделится на две части: верхнюю с открытой усадочной раковиной, близкой по конфигурации к перевернутому конусу, и нижнюю плотную максимальной протяженности для таких условий неприбыльного литья.

По мере снижения интенсивности затвердевания за счет увеличения зоны твердожидкого состояния поперечные сечения усадочной раковины уменьшатся, зато может несколько увеличиться глубина [1, с. 95], а под раковиной появится рыхлота, поэтому высота нижней плотной части соответственно уменьшится.

При очень низкой интенсивности затвердевания СОП также резко уменьшится, а роль теплоизлучения с открытой поверхности возрастет, что благоприятствует образованию корочки. Более того, последующий медленный прогиб корочки под действием усадки и атмосферного давления некоторое время не нарушит ее сплошности (табл. 1), и за это время она еще упрочнится и начнет оказывать определенное сопротивление. Это приведет к понижению давления внутри отливки. А поскольку на боковой поверхности цилиндра к этому времени нарастет корочка также небольшой толщины, то из-за создавшегося перепада давлений она начнет прогибаться внутрь отливки. Здесь уместно привести результаты выполненных в работе [4] экспериментальных исследований кинетики образования утяжин в зависимости от геометрической формы поверхности отливки. Оказалось, что в сечениях, где утяжка небольшая, деформируется только плоская поверхность. По мере увеличения объема утяжин деформируется и цилиндрическая, причем в зоне больших утяжин степень деформации со стороны цилиндрической поверхности в ряде случаев значительно больше, чем со стороны плоской. Объясняется это тем, что вначале под действием усадочных напряжений прогибается плоская поверхность как менее жесткая по сравнению с цилиндрической. С увеличением стрелы прогиба силы реакции прогнувшейся плоской корочки возрастают и при определенной степени деформации величина усадочных напряжений может оказаться достаточной для преодоления жесткости цилиндрической корочки. Деформация последней сопровождается не столько растяжением, как это наблюдается со стороны плоской корочки, сколько изгибом, что требует меньших усилий, поэтому дальнейшее развитие процесса утяжки протекает преимущественно за счет прогиба цилиндрической поверхности.

Следует также учесть, что в результате утяжки между отливкой и формой образуется зазор, который дополнительно снижает интенсивность теплоотвода и сохраняет боковой корочке высокую температуру. В результате компенсация усадки затвердевания осуществляется в основном за счет утяжки. Известны случаи полу-

чения в таких условиях (толщина стенки кокиля 2-4 мм) цилиндрических отливок диаметром 50 мм и высотой ~200 мм с высокой плотностью при отсутствии в верхней части открытой усадочной раковины [1, с. 92]. Однако, поскольку необработанные расплавы обычно содержат определенное количество неметаллических включений, снижающих прочность расплава на разрыв, то средняя по высоте часть отливки, затвердевающая в последнюю очередь (из-за утяжки и удаленности от торцевых эффектов), оказывается негерметичной и пораженной газоусадочными дефектами. Боковая поверхность таких отливок матовая (рис. 1, б, слева).

По мере увеличения интенсивности теплоотвода и утолщения боковой корочки по сравнению с верхней утяжка уменьшается или вовсе исчезает, поэтому разрежение внутри отливки возрастает, что приводит к разрушению неокрепшей верхней корочки, образованию цепочки усадочных раковин в осевой части отливки и появлению газовой пористости.

Для необработанных расплавов, близких по составу к эвтектике и затвердевающих с нечетко выраженной твердожидкой зоной [5], достаточно прочная и плотная корочка на открытой поверхности отливки практически не образуется независимо от интенсивности затвердевания.

Эффективным средством борьбы с утяжкой и ее негативными последствиями является вакуумирование пространства, окружающего отливку. При этом происходит резкое снижение перепада давлений, причем не только за счет снятия атмосферного давления, но и в связи с интенсификацией газовыделения внутри отливки. Последний фактор можно усилить или даже заменить им вакуумирование путем специального наводороживания расплава, например, погружением влажного асбестового тампона, но при этом следует учитывать ряд обстоятельств.

Во-первых, степень наводороживания должна быть достаточной не только для устранения утяжки, но и для компенсации усадки затвердевания обособленными газовыми порами, не нарушающими герметичности и других требований, предъявляемых к литому изделию. Чем выше температура расплава во время обработки, тем больше содержание водорода. Чем интенсивнее перемешивание расплава во время обработки, тем быстрее происходит насыщение, но уровень содержания водорода трудно поднять выше растворимости [6, с. 138].

Во-вторых, во время медленного снятия перегрева и начальной стадии кристаллизации с низкой интенсивностью теплоотвода значительная часть водорода уходит из расплава путем диффузии (аналогично рафинированию подстуживанием). Например, чугунный кокиль с рабочей полостью диаметром 50 мм и толщиной стенки 2 мм после заливки в него расплава АК7 при температуре 740-750 °С прогревается до температуры, близкой к ликвидусу; аналогичный кокиль с толщиной стенки 4 мм прогревается до температуры несколько ниже ликвидуса после снятия перегрева и кристаллизации около 30 % расплава. Такой режим затвердевания, названный «прямым термическим методом реолитья», используется для формирования дендритной структуры без перемешивания [7].

Если в процессе понижения температуры и начальной стадии кристаллизации расплава содержание водорода окажется выше растворимости, начинают образовываться пузырьки, которые всплывают в верхнюю часть отливки, образуя там нежелательные скопления. Поэтому для перевода большей части водорода в полезную междендритную пористость путем его транзита через твердогазокластерные комплексы после наводороживания расплава следует либо сделать выдержку (до получаса), либо непосредственно перед заливкой быстро охладить наводороженный расплав в промежуточном ковше до допустимой для заливки температуры [6, с. 110]. Если же оставшегося водорода окажется недостаточно, будут иметь место явления, характерные для необработанного расплава.

В-третьих, для задержания пузырьков водорода в местах их зарождения важно быстрое образование сплошного кристаллического каркаса, что, казалось бы, связано с температурным интервалом затвердевания сплава и формой первичных

кристаллов. Однако опыт работы с наводороженными узкоинтервальными сплавами, близкими по составу к эвтектике, говорит о том, что и в этом случае возможно получение бесприбыльных герметичных отливок без открытой усадочной раковины. По-видимому, водорода, выделяющегося из расплава у фронта кристаллизации, оказалось достаточно для полной компенсации усадки затвердевания в условиях воздействия атмосферного давления, а слабого кристаллического каркаса [5] – для удержания газовых пузырьков в местах их зарождения.

В-четвертых, уменьшить утечку водорода из наводороженного расплава и устранить всплывающую пористость в отливке можно с помощью избыточного газового давления. Однако действие этого давления должно прекратиться после образования сплошного кристаллического каркаса, чтобы не препятствовать образованию рассредоточенной газовой пористости, компенсирующей усадку затвердевания, и не вызвать утяжку.

В-пятых, эффективным средством повышения объема газовой пористости является вакуумирование затвердевающей отливки, которое целесообразно создавать после образования сплошного кристаллического каркаса. При этом происходят интенсификация выделения водорода из расплава и расширение образующихся пузырьков.

В подтверждение высказанных предложений в табл. 2, 3 приведены экспериментальные данные [1] по влиянию конкретных режимов обработки расплава и теплосиловых условий затвердевания отливок диаметром 50 мм и высотой 190 ± 10 мм из сплавов с различной степенью эвтектичности на характер пористости и герметичность, которые расположены в порядке убывания показателей герметичности. В табл. 2 включены отливки с одним непрерывным герметичным участком, отсчитываемым от нижнего торца, а в табл. 3 – отливки с двумя разделенными герметичными участками, расположенными один снизу, другой сверху. Герметичными условно приняты участки с протяженностью пор в осевом направлении меньше 10 мм, а негерметичными – более 10 мм. Протяженность пор определяли продувкой сжатым воздухом (0,5 МПа) в воде вырезаемых из отливок и последовательно стачиваемых дисков [1].

Из табл. 2 видно, что для доэвтектического сплава АК5М2 наиболее высокие показатели по герметичности (100 %) обеспечивали, в основном, два комплекса воздействий. Первый включал высокотемпературное (1060 °С) наводороживание расплава водяным паром в графитовом тигле высокочастотной установки с последующим охлаждением в тигле с теплоизоляционной набивкой внутри автоклава до температуры 750-785 °С, повышение давления в автоклаве до 0,5 МПа, заливку расплава в чугунный кокиль с толщиной стенки 4 мм, а через 20-120 с после заливки понижение давления до атмосферного (позиции 1, 3, 6, 9). Второй комплекс включал наводороживание расплава водяным паром в чугунном тигле печи сопротивления при температуре 740 °С, выдержку от 3 до 20 мин, заливку в чугунный кокиль с толщиной стенки преимущественно 4 мм, а после образования сплошного кристаллического каркаса – вакуумирование (в специальной камере) до остаточного давления 0,05 МПа (поз. 2, 4, 5, 7, 8, 10). Отклонение от этих режимов сокращает протяженность герметичного участка. В меньшей мере сказывается снижение интенсивности затвердевания за счет уменьшения толщины стенки кокиля до 2 мм (поз. 11, 12), в большей мере – повышение интенсивности затвердевания за счет увеличения толщины стенки кокиля до 8-16 мм (поз. 13, 14, 17, 18), увеличение выдержки после наводороживания (поз. 15), отсутствие наводороживания (поз. 14, 16, 17, 19) и особенно чрезмерный вакуум (поз. 16, 19) как и отсутствие вакуума после образования сплошного кристаллического каркаса (поз. 18).

Для эвтектического сплава СИЛ-0 (АК12) по многим позициям (21, 23, 26, 27, 29-31, 33-38, 40) получаемая картина близка к сплаву АК5М2. Но есть и существенные дополнения, например, влияние изменения величины давления в автоклаве после высокотемпературного наводороживания расплава и понижения его температуры

Таблица 2. Параметры одночастковой (сплошной) герметичности отливок диаметром 50 и высотой 180-200 мм в зависимости от режимов наводороживания расплава и теплосиловых условий затвердевания

Номер позиции	Виды воздействия на расплав и затвердевающую отливку	$\delta_{сг}$, мм	$I_{г}$, %	$l_{г}$, мм		Π , %		ХРП
				пр	max	пр	max	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
сплав АК5М2								
1	часовое Н под влажным асбестом при 1060 °С, перелив в автоклав, охлаждение при P_a до 785 °С, $P_{наб} = 0,5$ МПа заливка и кристаллизация 120 с, дальше P_a	4	100	4	6	3,2	3,8	7
2	(2% Fe; 2,3% Cu), Н паром, выдержка 20 мин, после ОСКК $P_{ост} = 0,05$ МПа, $T_p = 740$ °С	4	100	2	4	7	7	7
3	часовое Н под влажным асбестом при 1060 °С, перелив в автоклав, охлаждение при P_a до 785 °С, $P_{наб} = 0,5$ МПа заливка и кристаллизация 25 с, дальше P_a .	4	100	2	6	5	5,5	7
4	Н паром 3 мин, выдержка 20 мин, после ОСКК $P_{ост} = 0,05$ МПа, $T_p = 740$ °С	4	100	4	6	5	5,5	7(5)
5	(2,8% Fe; 2,8% Cu), Н паром, выдержка 20 мин, после ОСКК $P_{ост} = 0,05$ МПа, $T_p = 740$ °С	4	100	2-4	6	6	7	5
6	часовое Н под влажным асбестом при 1060 °С, перелив в автоклав, охлаждение при P_a до 750 °С, $P_{наб} = 0,5$ МПа заливка и кристаллизация 20 с, дальше P_a	4	100	2	6	7	8	7
7	Н формовочной смесью, выдержка 20 мин, после ОСКК $P_{ост} = 0,05$ МПа, $T_p = 740$ °С	4	100	4	8	5,5	6,5	5
8	(2,3% Fe; 2,8% Cu), Н паром, выдержка 3 мин, после ОСКК $P_{ост} = 0,05$ МПа, $T_p = 740$ °С	4	100	4	8	5	6,5	5
9	часовое Н под влажным асбестом при 1060 °С, перелив в автоклав, при $P_{наб} = 0,5$ МПа, охлаждение до 750 °С, заливка и кристаллизация 28 с, дальше P_a	4	100	4	10	7,5	8,5	5
10	Н (3 мин), выдержка 15 мин, после ОСКК $P_{ост} = 0,056$ МПа, $T_p = 740$ °С	2	100	6	10	1-9	9	3

продолжение табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
11	Н (3 мин), выдержка 35 мин, после ОСКК $P_{\text{ост}} = 0,056$ МПа, $T_n = 740$ °С	2	78	2-4	4	2-8	8	5
12	Н, выдержка 15 мин, после ОСКК $P_{\text{ост}} = 0,056$ МПа, $T_p = 740$ °С	2	78	2-8	8	2-8	8	5
13	$T_p = 740$ °С, Н влажным асбестом, выдержка 8 мин	16	56	4	6	1	1,8	5
14	$T_n = 740$ °С	16	50	3	4	0,4	1,5	4(3)
15	Н, выдержка 46 мин, после ОСКК $P_{\text{ост}} = 0,056$ МПа, $T_p = 740$ °С	4	50	2	8	2-6	6	5
16	$T_p = 740$ °С, после ОСКК $P_{\text{ост}} = 0,02$ МПа	4	40	2-4	4	0,5-5,0	5	6
17	$T_n = 740$ °С	8	33	2	5	0,5-2,5	2,5	4(1)
18	Н влажным асбестом, выдержка 8 мин, $T_p = 740$ °С	8	33	2-6	6	1,0-3,5	3,5	7(5)
19	$T_p = 740$ °С, после ОСКК $P_{\text{ост}} = 0,0035$ МПа	4	30	2	4	0,5-6	6	1
силва СИЛО (АК12)								
20	часовое Н под влажным асбестом при 1060 °С, перелив в автоклав, при P_a охлаждение до 785 °С, заливка и кристаллизация	4	100	2	2	2,0-4,3	4,3	1
21	часовое Н под влажным асбестом при 1060 °С, перелив в автоклав, охлаждение при P_a до 850 °С, $P_{\text{наб}} = 0,5$ МПа, заливка и кристаллизация 80 с, дальше P_a	4	100	2	4	5	5,3	7
22	$T_{\text{зал}} = 740$ °С, через 60 с $P_{\text{ост}} = 0,015$ МПа	4	100	2	4	6	6	5(7)
23	Н, выдержка 10 мин, $T_{\text{зал}} = 740$ °С, через 90 с (30 с после ОСКК) $P_{\text{ост}} = 0,05$ МПа	4	100	2	6	5	5	7
24	Н влажным асбестом, выдержка 8 мин, $T_{\text{зал}} = 740$ °С	4	100	2	6	1-8	7,7	3(4)
25	$T_3 = 750$ °С, через 75 с $P_{\text{ост}} = 0,01$ МПа	4	100	2	6	4,5	6,5	5
26	Н, выдержка 30 мин, $T_{\text{зал}} = 740$ °С, через 90 с $P_{\text{ост}} = 0,05$ МПа	4	100	2	10	5	6	7(2)
27	часовое Н под влажным асбестом при 1060 °С, перелив в автоклав, при $P_{\text{наб}} = 0,5$ МПа охлаждение до 750 °С, заливка и кристаллизация 64 с, дальше P_a	4	84	2	2	4	4,3	5
28	$T_{\text{зал}} = 750$ °С, через 85 с $P_{\text{ост}} = 0,015$ МПа	4	84	2	8	0-4	4	4(3)
29	$T_{\text{зал}} = 740$ °С	16	79	2	2	0,2	1,5	5

продолжение табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
30	$T_{\text{зал}} = 740 \text{ }^\circ\text{C}$	2	79	2	4	0,2	3,5	5
31	Н влажным асбестом, выдержка 8 мин, $T_{\text{зал}} = 740 \text{ }^\circ\text{C}$	16	68	2	2	0,4	1,2	5
32	часовое Н под влажным асбестом при $1060 \text{ }^\circ\text{C}$, перелив в автоклав, охлаждение при $P_{\text{а}}$ до $850 \text{ }^\circ\text{C}$, при $P_{\text{исб.6}} = 0,2 \text{ МПа}$ заливка и кристаллизация	4	63	2	2	2,5	3,5	5
33	$T_{\text{зал}} = 750 \text{ }^\circ\text{C}$, через $75 \text{ с } P_{\text{ост}} = 0,025 \text{ МПа}$	4	63	2	2	1	1,5	5
34	$T_{\text{зал}} = 750 \text{ }^\circ\text{C}$, через $75 \text{ с } P_{\text{ост}} = 0,05 \text{ МПа}$	4	63	2	8	0,3	1	5
35	$T_{\text{зал}} = 750 \text{ }^\circ\text{C}$, через $60 \text{ с } P_{\text{ост}} = 0,003 \text{ МПа}$	4	63	2-10	10	0-23	23	3(1/2)
36	Н влажным асбестом, выдержка 8 мин, $T_{\text{зал}} = 740 \text{ }^\circ\text{C}$	8	58	2	2	1	1,3	5
37	$T_{\text{зал}} = 740 \text{ }^\circ\text{C}$	4	53	2	2	0,2	1	5
38	$T_{\text{зал}} = 740 \text{ }^\circ\text{C}$	8	53	2	2	0,2	0,5	5
39	часовое Н под влажным асбестом при $1060 \text{ }^\circ\text{C}$, перелив в автоклав, при $P_{\text{а}}$ охлаждение до $850 \text{ }^\circ\text{C}$, при $P_{\text{исб.6}} = 0,5 \text{ МПа}$ заливка и кристаллизация	4	53	4	4	0,8	1	5
40	$T_{\text{зал}} = 750 \text{ }^\circ\text{C}$, через $140 \text{ с } P_{\text{ост}} = 0,003 \text{ МПа}$	4	42	2	8	0-11	11,5	8(1)

Сглав АК9

41	кокиль в сухой песчаной засыпке и с теплоизоляцией торцов (снизу асбест толщиной 8 мм, сверху вага), Н 2 мин, выдержка 5 мин и заливка при $615 \text{ }^\circ\text{C}$	2	100	2	4	2-6	5,7	1
42	кокиль в песчаной засыпке и с теплоизоляцией торцов, переплав после модифицирования стронцием (0,07 %) и Н при $745 \text{ }^\circ\text{C}$, повторное Н, выдержка 5 мин и заливка при $625 \text{ }^\circ\text{C}$.	2	100	2-10	10	4-6	6	1

Значения символов и сокращений: δ_k – толщина стенки кокиля; L_r – относительная протяженность герметичного участка ($L < 10 \text{ мм}$); L_n – протяженность негерметичного участка ($L > 10 \text{ мм}$); l – предельная протяженность поры в осевом направлении на герметичном участке: пр – преимущественно, мах – максимальное значение; П – пористость; ХРП – характер распределения пористости: 1 – купол с вершиной посередине, 2 – купол с вершиной ниже середины, 3 – купол с вершиной выше середины, 4 – площадка – купол, 5 – подъем – площадка – подъем, 6 – подъем – площадка – снижение, 7 – подъем – площадка – купол – подъем; Н – наводороживание; $P_{\text{а}}$ – давление атмосферное; $P_{\text{исб.6}}$ – давление избыточное; $P_{\text{ост}}$ – давление остаточное; T_p – температура расплава; ОСКК – образование сплошного кристаллического каркаса; h – расстояние от нижнего торца отливки

Таблица 3. Параметры двухчастковой (неплошной) герметичности бесприбыльных отливок диаметром 50 и высотой 180-200 мм в зависимости от режимов наводороживания расплава и теплосиловых условий затвердевания

Номер позиции	Виды воздействия на расплав и затвердевающую отливку	$\delta_k, \text{мм}$	Суммарная $L_r, \%$	$L_n, \text{мм}$	Π_{max} на $L_n, \%$	ХРП
1	2	3	4	5	6	7
сплав АК5М2						
1	Н, выдержка 8 мин, $T_p = 740^\circ \text{C}$	4	89	20	7	4(3)
2	(1,1 % Fe; 1,8 % Cu) $T_p = 750^\circ \text{C}$	4	89	20	5	3
3	Н, выдержка 8 мин, $T_p = 740^\circ \text{C}$	2	85	30	8	4(3)
4	$T_p = 750^\circ \text{C}$	2	80	40	5,5	4(3)
5	(2,8 % Fe; 2,8 % Cu) $T_p = 750^\circ \text{C}$	4	80	40	7,4	3
6	после ОСКК $P_{\text{ост}} = 0,04 \text{ МПа}$, $T_p = 740^\circ \text{C}$	2	80	20	7	3
7	Н (3 мин), через 15 мин введен TiB, $T_p = 730^\circ \text{C}$	4	78	40	6,4	1
8	введен TiB, $T_p = 750^\circ \text{C}$	4	78	40	8	1
9	$T_p = 750^\circ \text{C}$	4	78	40	6,2	4(3)
10	Н форм, смесь, выдержка 5 мин, $T_p = 740^\circ \text{C}$	4	78	40	5,3	3
11	Н форм, смесь, выдержка 30 мин, $T_p = 740^\circ \text{C}$	4	78	40	6,5	1
12	(2,3 % Fe; 2,8 % Cu) $T_p = 750^\circ \text{C}$	4	78	40	4,2	4(3)
13	(2,8 % Fe; 2,8 % Cu), Н паром, выдержка 30 мин, $T_p = 740^\circ \text{C}$	4	78	40	6	1
14	часовое Н влажным асбестом при 1060°C , перелив в автоклав, охлаждение при P_a до 850°C , при $P_{\text{исб}} = 0,5 \text{ МПа}$ заливка и полная кристаллизация	4	75	60	3,2	1
15	часовое Н влажным асбестом при 1060°C , перелив в автоклав, охлаждение, заливка и кристаллизация при P_a	4	70	35	5	1

продолжение табл. 3

1	2	3	4	5	6	7
16	(2 % Fe; 1,8 % Cu) Н паром, выдержка 20 мин, после ОСКК $P_{\text{ост}} = 0,05$ МПа, $T_p = 740$ °С	4	70	20	6	5
17	после ОСКК $P_{\text{ост}} = 0,02$ МПа, $T_p = 740$ °С	4	70	40	6	5
18	часовое Н влажным асбестом при 1060 °С, перелив в автоклав, охлаждение при P_a до 730 °С, при $P_{\text{исг}} = 0,5$ МПа заливка и полная кристаллизация	4	67	60	4	1
19	(2,8 % Fe; 2,8 % Cu), $T_p = 750$ °С	4	67	40	3,5	8
20	(2 % Fe; 3,3 % Cu), $T_p = 750$ °С	4	67	40	5	4
21	введен TiВ, Н, выдержка 20 мин, $T_p = 750$ °С	4	67	60	7	1
22	$T_p = 750$ °С	4	67	40	4,5	1
23	введен TiВ, $T_p = 750$ °С	4	67	40	4,7	1
24	7+после ОСКК $P_{\text{ост}} = 0,05$ МПа	4	56	80	8	2
25	Н, выдержка 46 мин, после ОСКК $P_{\text{ост}} = 0,056$ МПа, $T_p = 740$ °С	4	56	80	5	1
26	21+ после ОСКК $P_{\text{ост}} = 0,05$ МПа	4	40	60	8	2(5)
сплав СИЛО (АК12)						
27	Н влажный асбест, выдержка 8 мин, $T_{\text{зал}} = 750$ °С	2	95	10	6,3	3(4)
28	$T_{\text{зал}} = 750$ °С, через 140 с $P_{\text{ост}} = 0,015$ МПа	4	84	20	5,5	4(3)
29	$T_{\text{зал}} = 750$ °С, через 80 с $P_{\text{ост}} = 0,003$ МПа	4	53	60	18,6	1
сплав АК9						
30	кокиль в сухой песчаной засышке и с теплоизоляцией торцев (снизу асбест толщиной 8 мм, сверху вата), Н 2 мин, выдержка 5 мин, заливка при 710 °С	2	53	80	5,5	8

до заданной и поддержания этого давления до окончания затвердевания отливки. Оказалось, что при отсутствии избыточного давления (поз. 20) водорода, выделяющегося из расплава, было достаточно для компенсации усадки затвердевания и образования рассредоточенной обособленной газовой пористости с протяженностью пор до 2 мм и обеспечения 100%-ной герметичности. В то же время избыточное давление 0,5 МПа (поз. 39) воспрепятствовало выделению водорода из наводороженного расплава, и отливка формировалась также, как в случае необработанного расплава, когда верхняя часть выполняет функции прибыли по отношению к нижней, поэтому протяженность герметичного участка составила всего 53 %. При промежуточном избыточном давлении 0,2 МПа (поз. 32) протяженность герметичного участка (63 %) получилась также промежуточной. Оказалось также возможным существенно упростить получение высоких показателей герметичности, например, одним наводороживанием расплава влажным асбестом в чугунном тигле при температуре 740 °С с выдержкой 8 мин (поз. 24) либо даже без наводороживания, а только вакуумируя затвердевающую отливку (после ОСКК) до остаточного давления 0,01-0,015 МПа (поз. 22, 25, 28). В последнем случае, по-видимому, было благоприятным содержание водорода и твердых неметаллических включений в исходном расплаве.

На сплаве АК9 проверяли только влияние очень низкой интенсивности затвердевания в кокиле с толщиной стенки 2 мм, окруженном с боковой поверхности сухой песчаной засыпкой, снизу асбестовым слоем толщиной 8 мм, а сверху после заливки огнеупорной ватой. 100%-ная герметичность получена при температуре наводороживания и заливки 615-625 °С, то есть при небольшом перегреве (поз. 41, 42).

Перед анализом табл. 3 следует, во-первых, сделать логическое предположение, что в нее вошли отливки, у которых на открытой поверхности образовалась плотная затвердевшая корочка, без которой представить двухчастковую герметичность (в нижней и верхней частях) затруднительно. Во-вторых, следует обратить внимание, что 85 % отливок изготовлены из доэвтектического сплава АК5М2. Большинство из них затвердевало при постоянном атмосферном или избыточном давлении, что способствовало образованию утяжин и затрудняло газовыделение из расплава, тем более, что значительное количество отливок формировалось из необработанного расплава. Некоторые отливки (поз. 6, 24-26) в процессе затвердевания вакуумировали, но их расплав либо не подвергался наводороживанию, либо подвергался, но затем чрезмерно долго выстаивал перед заливкой. Что-то необычное произошло с отливкой на позиции 16, которая, судя по комплексу воздействий, должна находиться в табл. 2 на верхних позициях.

Из сплава СИЛ-О (АК12) в табл. 3 попали только 3 отливки, из которых две (поз. 27, 28) с высокими показателями герметичности (84-95 %) из-за случайных отклонений в ту или иную сторону стоят на грани между табл. 2 и 3, поэтому не нуждаются в дополнительном анализе. Примерно так же обстоит дело и с третьей отливкой (поз. 29) при сравнении с ее аналогами из табл. 2, у которых показатели герметичности также низкие (поз. 35, 40). По-видимому, из-за очень низкого остаточного давления (0,003 МПа) и, соответственно, интенсивного газовыделения формирование газовых пор (раковин) и их влияние на герметичность имели нестабильный характер.

Отливка из сплава АК9 (табл. 3, поз. 30) отличается от своих аналогов по табл. 2 (поз. 41, 42) только более высокой температурой наводороживания и заливки расплава (710 °С). Этого оказалось достаточно для резкого падения показателей герметичности, в том числе разделения на части. Повышение перегрева удлинит пребывание отливки в жидкоподвижном состоянии и увеличило количество удалившегося водорода. Несмотря на более продолжительное время затвердевания, пористость оказалась ниже, чем в аналогах, и недостаточной для качественной компенсации усадки.

Таким образом, на основании выполненных экспериментальных и аналитических исследований можно сделать следующие выводы.

- Питание отливки прибылью осуществляется в три этапа:
 - опускание жидкости и жидкотвердой массы с образованием сужающейся воронки;
 - опускание твердожидкой массы с уплотнением кристаллического каркаса в верхнем слое и образованием расширяющейся воронки;
 - локальное выдавливание расплава из твердожидкой массы с образованием сообщающихся каналов переменного сечения.
- После прекращения питания прибылью внутреннее давление замкнутого металлоемкого узла определяется либо величиной внешнего давления за вычетом сопротивления затвердевшей корочки деформации в процессе образования утяжин, либо величиной газового давления в образовавшихся пузырьках за вычетом капиллярного давления со стороны расплава, окружающего пузырьки. Чем ниже внутреннее давление, тем интенсивнее образуются и расширяются газовые пузырьки, компенсирующие усадку затвердевания.
- Важную роль в формировании бесприбыльной отливки играет образование на открытой поверхности плотной и достаточно прочной корочки, благодаря которой сохраняется наружная конфигурация отливки и происходит регулирование внутреннего давления: понижение при недостаточном газовыделении и повышение при чрезмерном, благодаря чему поддерживается баланс между объемом газовой фазы и усадкой затвердевания. Образованию такой корочки благоприятствует уменьшение скорости перемещения питающего расплава относительно отливки, которое, в свою очередь, создается замедлением процесса затвердевания и интенсификацией газовыделения из расплава путем его предварительного наводороживания и вакуумирования затвердевающей отливки. При нулевой скорости относительного перемещения питающего расплава (полная компенсация усадки затвердевания дисперсной газовой фазой при атмосферном давлении) корочка теряет свою роль.
- После образования на открытой поверхности отливки плотной корочки и понижения внутреннего давления возможно образование утяжин на других участках с увеличением газового зазора между отливкой и формой, в результате чего эти участки затвердевают последними с концентрацией газоусадочных дефектов и нарушением герметичности. Эффективным средством ликвидации этого недостатка является вакуумирование окружающего отливку пространства.
- Экспериментально установлены два комплекса теплосиловых воздействий, обеспечивающих 100%-ную герметичность бесприбыльных силуминовых отливок диаметром 50 мм и высотой 200 мм. Первый комплекс включает высокотемпературное (1060 ± 10 °С) наводороживание расплава водяным паром с последующим охлаждением в теплоизолированном тигле автоклава до $750-785$ °С, повышение давления до 0,5 МПа, заливку в чугунный кокиль с толщиной стенки 4 мм, а через 20-120 с после заливки понижение давления до атмосферного. Второй комплекс включает наводороживание расплава водяным паром при температуре 740 ± 10 °С, выдержку от 3 до 20 мин, кристаллизацию с интенсивностью, эквивалентной чугунному кокилю с толщиной стенки 4 мм, а после образования сплошного кристаллического каркаса вакуумирование до остаточного давления 0,05 МПа.



Список литературы

1. Котлярский Ф. М., Борисов Г. П. Малоотходное литье алюминиевых сплавов. – Киев: Наук. думка, 2007. – 160 с.
2. Котлярский Ф. М. Формирование отливок из алюминиевых сплавов. – Киев: Наук. думка, 1990. – 216 с.
3. Котлярский Ф. М., Борисов Г. П. Влияние теплосилового воздействия на процесс питания отливок из алюминиевых сплавов: Препринт. – Киев: ИПЛ АН УССР, 1979. – 60 с.

4. Котлярский Ф. М. Исследование процесса формирования отливок из алюминиевокремниевых сплавов в зависимости от условий питания: Дис. ... канд. техн. наук. – Киев, 1975. – 216 с.
5. Котлярский Ф. М., Борисов Г. П. О состоянии двухфазной области кристаллизующихся силуминов // Процессы литья. – 2006. – № 1. – С. 22-25.
6. Котлярский Ф. М. Водород в алюминиевых сплавах и отливках. – Киев: Освіта України, 2011. – 208 с.
7. Борисов А. Г. О механизме формирования недендритной структуры // Процессы литья. – 2011. – № 5. – С.19-28.

Поступила 17.04.2012

УДК 621.74.01-621.74.042-621.74.046

Н. А. Жижкина

Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля, Луганск

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ МАССИВНЫХ ВАЛКОВ ПРИ ЦЕНТРОБЕЖНОМ ЛИТЬЕ

Изучено формирование массивных отливок, получаемых центробежным методом. Исследовано влияние давления вращающегося расплава на напряженно-деформированное состояние затвердевшей корки металла рабочего слоя. В результате получены зависимости, позволяющие рассчитать усилие давления вращающегося расплава и оценить напряженно-деформированное состояние корки затвердевшего металла. Установлено, что превышение уровня напряжений литой корки максимально допустимых значений для исследуемого материала приводит к нарушению ее сплошности.

Ключевые слова: отливки, центробежное литье, давление, напряженно-деформированное состояние, валки.

Вивченню формування масивних виливків, що отримують за допомогою відцентрового литва. Досліджено вплив тиску розплаву, що обертається, на напружено-деформований стан кірки металу робочого шару, що твердне. В результаті отримано залежності, що дозволяють розрахувати зусилля тиску розплаву, що обертається, та оцінити напружено-деформований стан кірки металу, що твердне. Встановлено, що перевищення рівня напружень литої кірки максимально допустимих значень для матеріалу, що досліджується, приводить до порушень її суцільності.

Ключові слова: виливки, відцентрове лиття, тиск, напружено-деформований стан, валки.

Devoted to study formation of massive castings, which got by centrifugal method. The influence rotated alloys pressure on stress and deformation condition of solid metal crust has been researched. As a result received relations make it impossible to calculate the force of rotated alloy pressure and to value the stress and deformation condition of solid metal crust. It has been established, that level of casted crust stresses excesses maximum permissible value for researched material, its solid is disturbed.

Keywords: castings, centrifugal casting, pressure, stress and deformation condition, rolls.

Массивные валки с рабочим слоем из высокотвердых и износостойких материалов изготавливают центробежным методом. Такое литье крупнотоннажных изделий, которое одновременно характеризуется износостойкостью и пластично-