

---

# ЗАТВЕРДЖЕННЯ СПЛАВІВ

УДК 621.746:669.715

**Ф. М. Котлярський**

Фізико-технологічний інститут металів і сплавів НАН України, Київ

## ФОРМУВАННЯ СИЛУМІНОВИХ ОТЛИВОК НА СТАДІИ ФІЛЬТРАЦІОННОГО ПИТАННЯ

*Розглянуто механізми утворення в силумінових виливках на стадії фільтраційного живлення дефектів, які порушують хімічну однорідність (ліквація), розмірну точність та зовнішній вигляд (утяжини), щільність литого металу (раковини та пористість). Предложено заходи їх усунення.*

**Ключові слова:** силумін, вилівок, живлення, фільтрація, дефекти, ліквація, утяжини, щільність.

*Rozглянуто механізми утворення в силумінових виливках на стадії фільтраційного живлення дефектів, які порушують хімічну однорідність (ліквація), розмірну точність та зовнішній вигляд (утяжини), щільність литого металу (раковини та пористість). Запропоновано заходи їх усунення.*

**Ключові слова:** силумін, виливок, живлення, фільтрація, дефекти, ліквація, утяжини, щільність.

*It was considered the mechanisms of formation in silumine castings at the stage of the filtration feeding of defects that distort the chemical homogeneity (segregation), dimensional accuracy and appearance (dimples), cast metal density (shrink hole and porosity). It was proposed measures to eliminate them.*

**Keywords:** silumine, cast, feeding, filtration, defects, segregation, dimples, porosity.

Стадія фільтраційного живлення найбільш відповідальна за якість отливки, особливо в плані щільності, хімічної однорідності та розмірної точності. Значительний об'єм досліджень в цьому напрямку виконаний в ФТИМС НАН України, однак отримані результати опубліковані в різний час, що ускладнює цілісне сприйняття озаглавленої проблеми, тому представляється цілесообразним обобщити накоплені матеріали.

Вообще-то, при литье сплавов, кристалізуючихся в інтервалі температур, на всіх етапах затвердження отливки живлення її твёрдо-жидкой зони здійснюється шляхом фільтрації розплаву крізь цю зону. Тем не менше, при аналізі умов формування отливки справедливо прийнято вважати, що стадія фільтраційного живлення настає з моменту утворення сплошного кристалічного каркаса во всьому незатвердівшому об'ємі розглянутого участка, то є коли в тепловому центрі отливки сомкнуться межі виливності. До цього моменту, в залежності від наявності вздовж теплової осі отливки шари рідини або суспензії, живлення вважається відповідно рідинним або суспензійним [1-5] і здійснюється

## Затвердевание сплавов

оно свободно, практически без потерь давления. После образования сплошного кристаллического каркаса подача питающей фазы со стороны прибыли возможна лишь путём фильтрации, в результате чего возникает продольный градиент давлений, величина которого, согласно закону Дарси, обратно пропорциональна коэффициенту фильтрации и площади проходного сечения.

Для протяжённых отливок из сплавов, кристаллизующихся в виде разветвлённых дендритов и имеющих сравнительно низкий коэффициент фильтрации, градиент давлений оказывается столь значительным, что не успевшие приобрести достаточную прочность кристаллы в осевой зоне под его воздействием деформируются в сторону движения жидкости [6, 7]. Из-за неоднородности схватывания и неравномерной прочности дендритов одни слои деформируются больше, чем другие, в результате чего между ними образуются разрывы, заполненные незатвердевшим расплавом. В итоге структура приобретает V-образный рисунок из чередующихся полос уплотнённых первичных кристаллов и легкоплавкой фазы [6, 8] (рис. 1, при литье под низким давлением питающий узел расположен снизу)\*. Наиболее интенсивно этот процесс протекает в подприбыльной части отливки, где расход питающего расплава максимальный. На этом участке установлено ещё одно интересное и важное в технологическом плане явление, связанное с тем, что именно здесь, между обогреваемой прибылью и затвердевающей отливкой образуется температурный градиент, из-за которого происходит избирательная кристаллизация опускающейся из прибыли питающей фазы с выделением тугоплавкой составляющей. Наслаиваясь на ранее образовавшиеся кристаллы, либо образуя новые, эти дополнительные выделения твёрдой фазы сужают междендритные каналы, ухудшая фильтрацию и увеличивая перепад давлений [6, 7]. Следует парадоксальный вывод, что на определённой стадии кристаллизации отливки подприбыльный участок с более высокой температурой не благоприятствовал процессу питания, а тормозил его.

По мере удаления от питающего узла степень деформации дендритов снижается, а на самых удалённых участках, через которые фильтруется незначительное

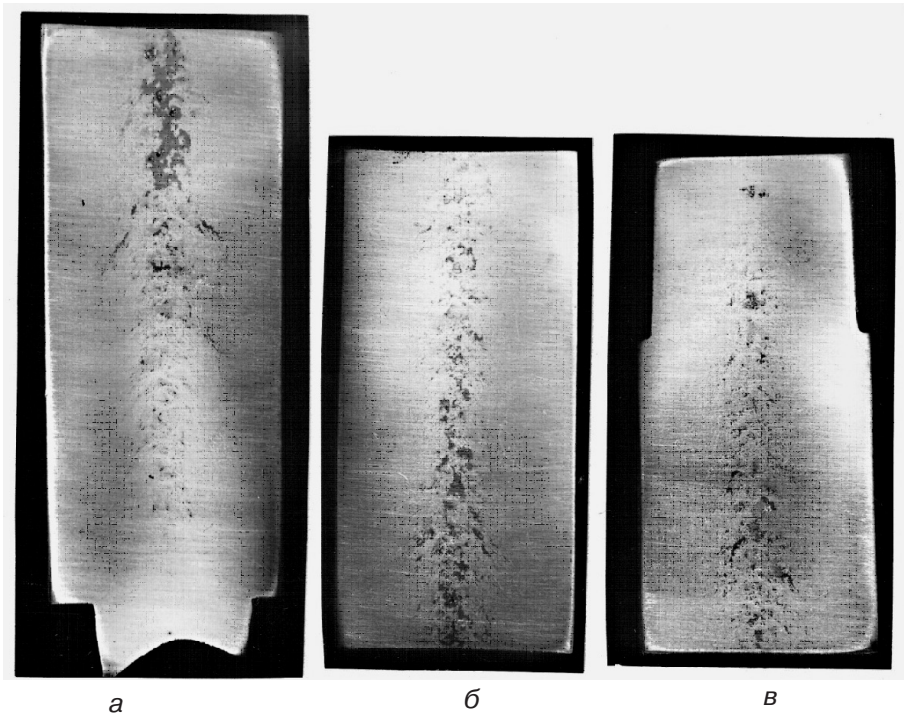


Рис. 1. Осевые сечения нижнего (а), среднего (б) и верхнего участков отливки из сплавов Al+8%Si, полученной литьём под низким давлением

\* В оформлении рисунков участвовал Т. Г. Цир

количество жидкого металла,  $V$  -образное распределение элементов структуры не наблюдается.

Поскольку тугоплавкая составляющая питающей фазы выделилась на подприбыльном участке отливки, более удалённые участки будут питаться легкоплавкой составляющей или эвтектикой. Спектральный анализ центральной зоны отливок диаметром 54 мм и высотой 400 мм, полученных литьём под низким давлением из сплава с исходным содержанием 7,5 % Si, показал, что в подприбыльном сечении концентрация кремния снизилась до 5 %, а по мере удаления от прибыли она постепенно возросла до 9,5 %. Наибольшие скопления эвтектики наблюдаются сразу после зоны с температурным градиентом. Несмотря на относительную близость к металлопроводу, именно здесь чаще всего сосредоточены усадочные дефекты. Этому способствует и то, что понижение содержания кремния с 7,5 до 5 % на нижнем участке и его повышение до 9,5 % на верхнем делит центральную область отливки на два сплава, существенно отличающихся не только кристаллическим строением, но и удельной теплотой кристаллизации (450 кДж у Al+5%Si и 500 кДж у Al+9,5%Si). Таким образом, сочетание частичной закупорки междендритных каналов со снижением теплоты кристаллизации центральной части на участке отливки, примыкающем к металлопроводу, и увеличение теплосодержания центральной части удалённых от металлопровода участков отливки ухудшает направленность затвердевания и качество питания отливки в целом.

По ходу кристаллизации перепад температуры по сечению отливки снижается, а концентрация твёрдой фазы и прочность каркаса в осевой части отливки повышаются, поэтому в массивных отливках (слитках) начинают сдвигаться более удалённые от оси слои твёрдо-жидкого металла. Это объясняется тем, что при одном и том же напоре сдвиговые напряжения линейно возрастают с увеличением радиуса зоны двухфазного состояния. Деформация сдвига произойдёт на таком расстоянии от оси, где значения сдвиговых напряжений превысят прочность кристаллического каркаса. Образовавшиеся при этом разрывы, в которые устремляется легкоплавкая фаза, создают внеосевой  $\Lambda$ -образный рисунок структуры [6, 7].

Преждевременное образование сплошного кристаллического каркаса на промежуточных участках между питающим узлом и более удалёнными участками отливки, на которых затвердевшая корочка не успела приобрести достаточную прочность, приводит к образованию утяжин даже в равностенных протяжённых отливках. Такая ситуация возникает при литье под низким давлением слабopерегретых сплавов и заполнении формы с малыми скоростями, когда кристаллизация расплава начинается уже в процессе заливки. К концу заполнения формы нижние участки отливки оказываются частично затвердевшими со сплошным кристаллическим каркасом, тогда как на верхнем участке расплав только начинает затвердевать. Если внутреннее давление на этом участке из-за фильтрации и усадочного разрежения опустится ниже атмосферного, возможно образование утяжины. На рис. 2 показана такая полуцилиндрическая отливка радиусом 25 мм и высотой 400 мм из сплава Al+5,8%Si. Причём утяжины образуются как со стороны плоской поверхности, так и со стороны цилиндрической. Несмотря на то, что цилиндрическая корочка более жёсткая, чем плоская, в ряде случаев более глубокие утяжины образуются со стороны цилиндрической поверхности. Объяснить это можно следующим образом. Вначале прогибается плоская поверхность, но по мере увеличения стрелы прогиба силы реакции возрастают и при определённой степени деформации величина напряжений может оказаться достаточной для преодоления жёсткости корочки со стороны цилиндрической поверхности. Деформация цилиндрической корочки в сторону её геометрической оси сопровождается не растяжением, как это имеет место при деформации плоской, а изгибом, что требует меньших усилий, поэтому дальнейшее развитие утяжки протекает преимущественно за счёт прогиба цилиндрической поверхности [9].

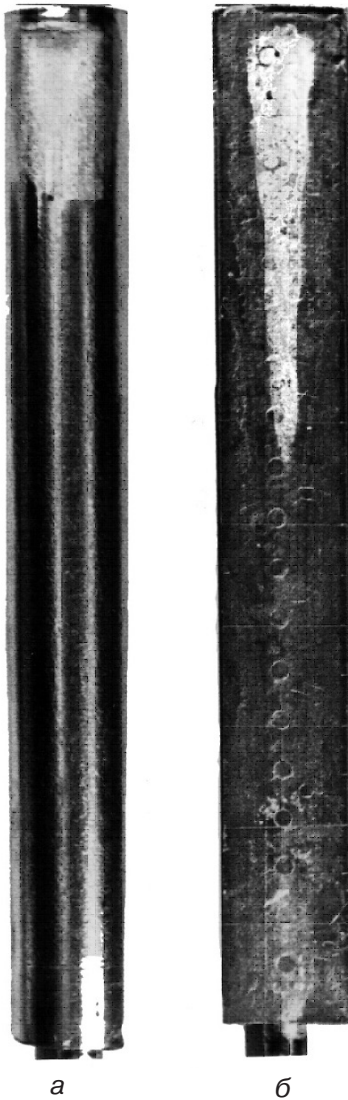


Рис. 2. Внешний вид отливок из сплава Al+5,8%Si со стороны цилиндрической (а) и плоской (б) поверхностей; скорость заполнения формы – 7 см/с; температура заливки – 750 °С

Плотность тех же полуцилиндрических отливок из сплава Al+5,8%Si в зависимости от технологических параметров литья под низким давлением представлена на рис. 3 [10], из которого видно, что в большинстве случаев по мере удаления от металлопровода этот показатель существенно понижался.

Таким образом, приведённые данные по ликвации, утяжке и пористости свидетельствуют о том, что литью под низким давлением и другим сходным методам литья, у которых заполнение форм расплавом и питание отливки осуществляется снизу, присущ характерный недостаток, состоящий в том, что наиболее удалённая от металлопровода верхняя часть формы заполняется в последнюю очередь, поэтому в верхней части протяжённой отливки при определённых условиях возможно образование теплового центра с описанными выше неприятными последствиями. Как показали экспериментальные исследования, улучшить положение можно организацией направленности затвердевания путём повышения перегрева расплава при низких скоростях заполнения формы.

При гравитационной заливке сверху наиболее удалённая от прибыли нижняя часть формы заполняется в первую очередь и, соответственно, протяжённая отливка начинает затвердевать снизу в сторону прибыли с соблюдением принципа направленности затвердевания, поэтому обычно эта наиболее удалённая от питающего узла нижняя часть протяжённой отливки бывает наиболее качественной.

Однако есть так называемые нетехнологичные для любых способов литья отливки, в которых толстенная часть отгорожена от узла питания тонкостенной. В месте перехода одной толщины стенки в другую чаще всего развиваются ликвационные и деформационные явления как следствие фильтрационного питания. Разностенную отливку моделировали [6] с помощью цилиндров разного диаметра: толстый цилиндр (назовём его отливкой) диаметром 50 мм, а расположенные между ним и

прибылью промежуточные узкие цилиндры (назовём их питателями) диаметром 20, 30, 40 и 50 мм (рис. 4). Температура неокрашенного кокиля перед заливкой изменялась от 25 до 520 °С, а температура алюминиевого сплава, содержащего 6 % кремния, составляла 750 °С. При минимальном диаметре питателя 20 мм в верхней части отливки фиксируется вытянутая сверху вниз концентрированная раковина, свидетельствующая о том, что к моменту затруднения и прекращения питания в этой зоне металл находился в жидкоподвижном состоянии. С увеличением диаметра питателя до 30 мм размеры раковины резко уменьшились, но рядом возникли ликвационные пятна из просочившейся сквозь кристаллический каркас легкоплавкой фазы (эвтектики). При диаметре питателя 40 мм раковины практически исчезли, а ликвационные пятна увеличились. В условиях нормального питания отливки через питатель диаметром 50 мм осевые ликвационные пятна и полосы исчезли.

## Затвердевание сплавов

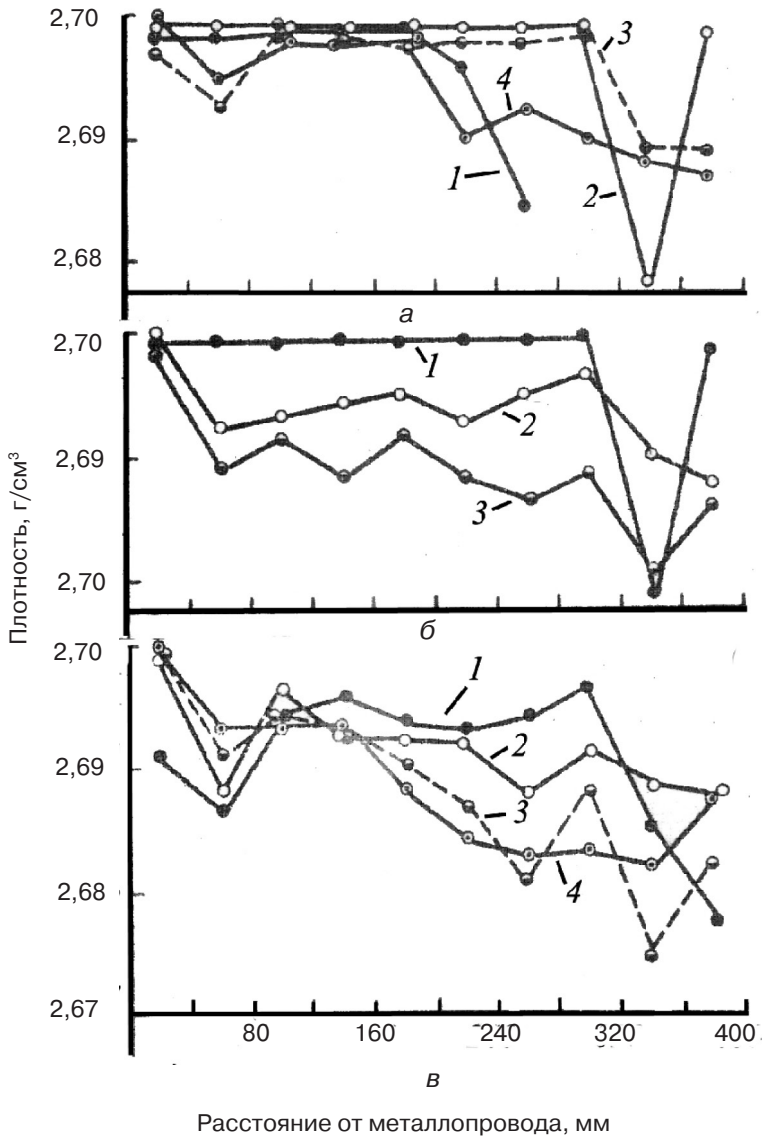


Рис. 3. Влияние температуры заливки  $T_3$  (а), скорости заполнения формы  $V$  (б) и избыточного давления  $P_H$  (в) на распределение плотности по высоте отливки: а –  $T_3$ , °С: 1 – 650, 2 – 750, 3 – 850, 4 – 950;  $V = 7$  см/с;  $P_H = 0,035$  МПа; б –  $V$ , см/с: 1 – 7,0; 2 – 12,0; 3 – 18,0;  $T_3 = 750$  °С;  $P_H = 0,035$  МПа; в –  $P_H$ , МПа: 1 – 0,018; 2 – 0,035; 3 – 0,06; 4 – 0,1;  $T_3 = 750$  °С;  $V = 12,0$  см/с; сплав Al+5,8%Si

По мере повышения температуры кокиля при питателе диаметром 30 мм (рис. 4, д, е, ж) всё большая часть раковин оказывалась заполненной легкоплавкой фазой, и в отливках, полученных при исходной температуре кокиля 380 и 520 °С раковины практически отсутствовали, а осевая ликвация приобрела более выраженный характер. Средняя плотность отливок в зависимости от температуры кокиля составляла: при 25 °С – 2672 кг/м<sup>3</sup>, при 380 °С – 2684 кг/м<sup>3</sup>, при 520 °С – 2681 кг/м<sup>3</sup>. В данном случае улучшение питания отливки может быть объяснено тем, что в условиях замедленного затвердевания повышается роль перетоков тепла из массивных участков в более узкие, в результате чего сокращается разница в продолжительности кристаллизации различных по толщине сечений.

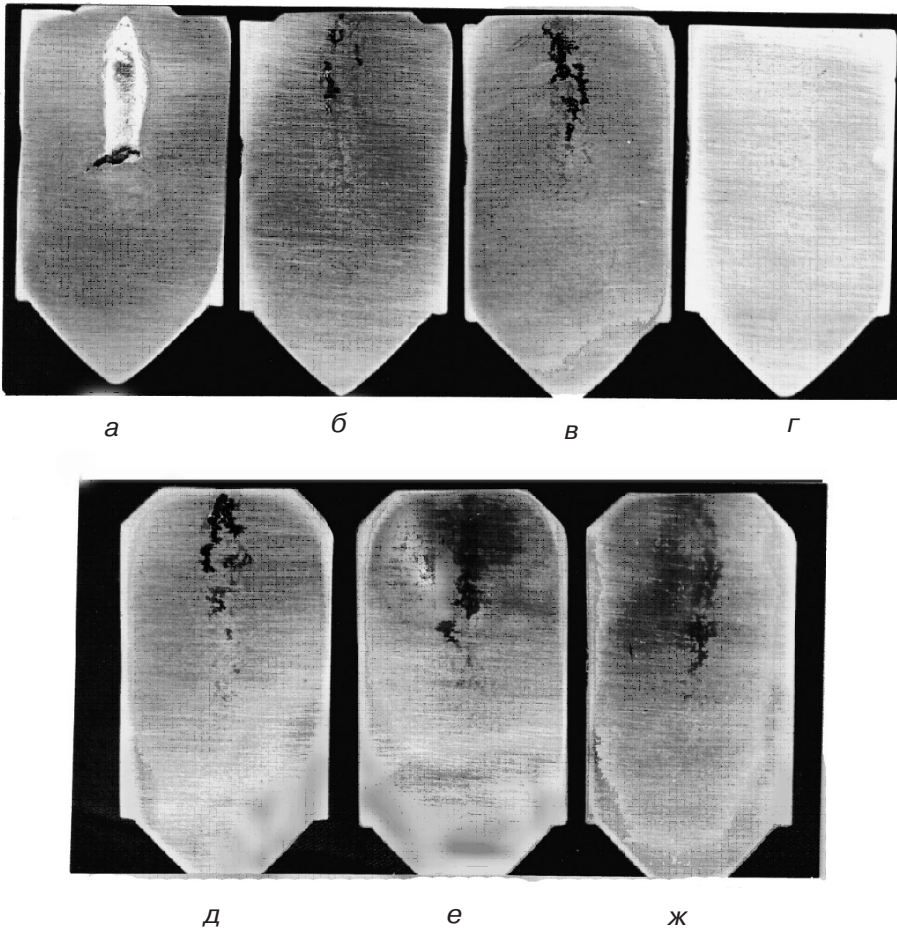


Рис. 4. Расположение раковин и ликвационных пятен в металлоёмких узлах диаметром 50 мм при верхнем расположении прибыли; диаметр питателя, мм: а – 20; б, д, е, ж – 30; в – 40; г – 50; температура кокиля, °С: а, б, в, г, д – 25; е – 380; ж – 520

Следует отметить, что в плане питания затвердевающей отливки снижение интенсивности теплоотвода помимо положительной стороны имеет и отрицательную.

Рассмотрим крайний случай, когда интенсивность охлаждения столь низкая, что перепад температур во всей отливке, включая прибыль, из-за перераспределения тепла отсутствует. Это не трудно представить применительно к алюминиевым сплавам, обладающим высокой теплопроводностью. В таких условиях образование связанного кристаллического каркаса происходит одновременно во всех частях отливки. При дендритной кристаллизации некоторых доэвтектических силуминов для этого достаточно выделиться 10-20 % твёрдой фазы. С этого момента прибыль прекращает нормально работать, поскольку вся её масса становится нежидкоподвижной, а передачу отливке междендритного расплава затрудняют капиллярные силы, возникающие в междендритных ячейках на открытой поверхности прибыли. Тем не менее какое-то питание продолжается за счёт деформации поверхности прибыли и образования в ней несплошностей под действием усадочного разрежения. Однако в тех же условиях находится и отливка, и в ней тоже под действием усадочного разрежения будут происходить те же деформационные процессы с образованием утяжин и трещин. Таким образом при очень низкой интенсивности теплоотвода затвердевающая отливка с прибылью может формироваться в режиме бесприбыльной.

Здесь рассмотрен крайний случай. В действительности при литье в сухие песчаные формы и окрашенные горячие кокили интенсивность теплоотвода промежуточная, а значит и результаты будут промежуточными.

Сохранить ступенчатую конструкцию не-технологичной отливки можно локальным замедлением интенсивности затвердевания более тонкой промежуточной части, выполняющей роль питателя, например, путём выполнения формы комбинированной: металлической в зоне расположения толстостенной части и из формовочной смеси в зоне тонкостенной части и прибыли (рис. 5).

Опытная отливка представляла два сопряжённых цилиндра, один из которых (диаметром 50 мм и высотой 100 мм) формировался в металлическом вытряхном кокиле а второй (диаметром от 5 до 40 мм с шагом 5 мм и высотой 70 мм) – в песчаном стержне с жидкостекольным связующим. В том же стержне выполнена прибыльная часть диаметром 50 мм и высотой 70 мм.

Чтобы учесть фактор материала отливки, исследовали чистый алюминий (А6), бинарный сплав алюминия с 6 % кремния, имеющий температурный интервал кристаллизации около 45 °С и образующий связанный кристаллический каркас вскоре после начала затвердевания при концентрации твёрдой фазы около 15 % [11], и близкий к эвтектическому сплав СИЛ-00 с содержанием кремния 11-12 %, у которого кристаллический каркас если и образуется, то на стадии затвердевания эвтектики. Исходная температура формы 25-30 °С, температура заливки расплава 740-750 °С.

Полученные отливки (рис. 6) после отрезки питателей с прибылями взвешивали для предварительной оценки полноты питания, а затем готовили продольные осевые макрошлифы. Судя по данным рис. 7, для питания затвердевающих в кокиле

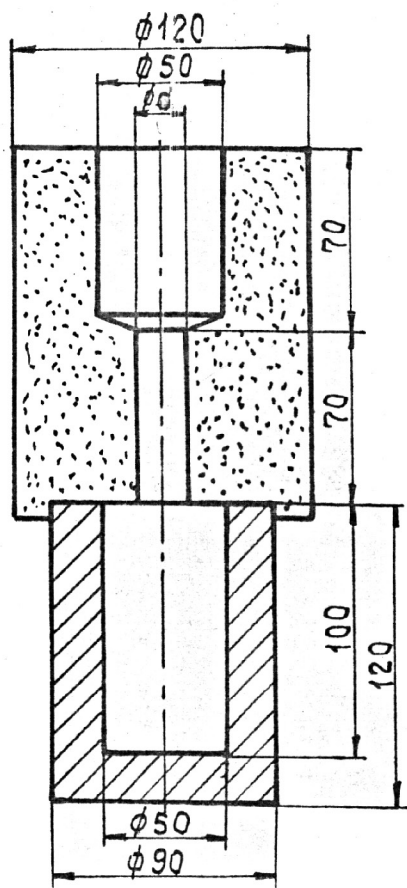


Рис. 5. Опытная песчано-металлическая форма

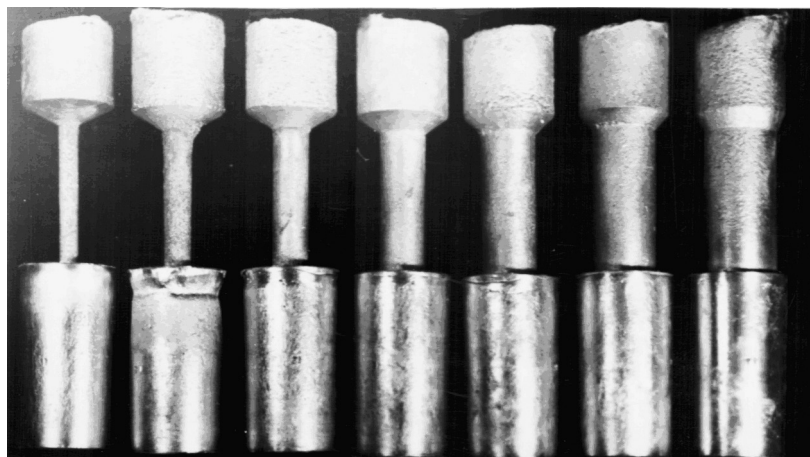


Рис. 6. Внешний вид опытных отливок с прибылями

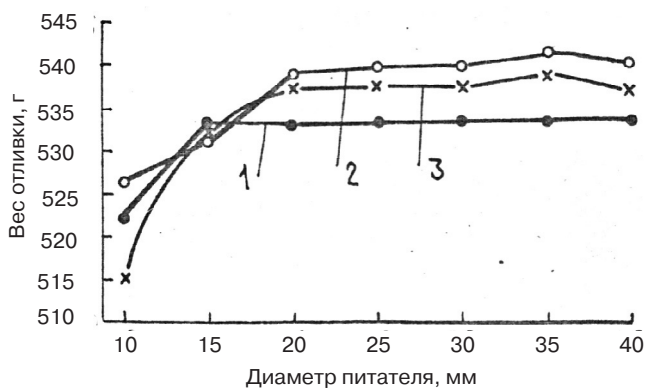


Рис. 7. Зависимость веса кокильной части отливки от диаметра песчаного питателя: 1 – Al; 2 – Al+6%Si; 3 – Al+11,5%Si

алюминиевых отливок диаметром 50 мм достаточно песчаного питателя диаметром 15 мм. Дальнейшее увеличение сечения питателя до 40 мм не даёт существенного эффекта – приращение веса не превышает 1 г (0,19 %).

Для отливок из обоих исследованных сплавов алюминия с кремнием диаметр песчаного питателя должен быть не менее 20 мм. По мере дальнейшего увеличения диаметра питателя до 35 мм наблюдается постепенное увеличение веса примерно на 2 г (0,37 %), а при диаметре 40 мм начинается процесс понижения плотности, связанный, по-видимому, с замедлением затвердевания верхней части отливки из-за перетоков в неё тепла питателя и образования, в результате, газовой пористости.

Анализ макрошлифов (рис. 8) показывает, что при питателях диаметром 5-10 мм в верхней части отливок внутри образуются большие концентрированные раковины, а на наружной поверхности ряда отливок (особенно из эвтектического сплава) – утяжины. С увеличением диаметра питателя сначала уменьшаются или вовсе исчезают раковины и утяжины, а затем то же самое происходит и со сменившими их пористостью и ликвационными пятнами. При диаметре питателя 20 и 25 мм визуально просматриваемые поры остаются только на отливках из эвтектического сплава. Аналогичное выделение эвтектического сплава из ряда других силуминов наблюдалось и в других работах [7, 9]. Это может быть следствием того, что в сравнительно широкоинтервальных доэвтектических силуминах большую роль в компенсации усадки затвердевания непропитываемых узлов играет деформация поверхности, то есть утяжка [7], что в свою очередь может быть следствием уменьшения содержания в расплаве включений  $Al_2O_3$  с понижением содержания кремния. Так из выполненного в работе [12] обзора по неметаллическим включениям следует, что в сплаве Al+11%Si содержание  $Al_2O_3$  в 6 раз больше, чем в сплаве Al+5%Si.

Таким образом, использование комбинированных песчано-металлических форм позволяет получать качественные силуминовые отливки с разностенностью в 2,0-2,5 раза для чистого алюминия и сплава Al+6%Si и в 1,5-2,0 раза для эвтектического сплава.

Описанные выше результаты экспериментальных исследований дают качественные представления о влиянии фильтрационного питания на формирование выявленных дефектов в тех или иных конкретных условиях. Что же касается теории этих процессов с возможностью их количественного расчёта и прогнозирования для любых возникших ситуаций, необходимо располагать, по крайней мере, значениями коэффициентов фильтрации и времени образования сплошного кристаллического каркаса, привязанных к реальным условиям затвердевания отливки, для чего разработаны [7] специальная методика и устройство, представленное схематично на рис. 9.

Металлическая форма 1 выполнена в виде усечённого конуса, расширяющегося снизу вверх под углом  $1,5^\circ$ . Нижняя толстостенная часть формы, теплоизолированная



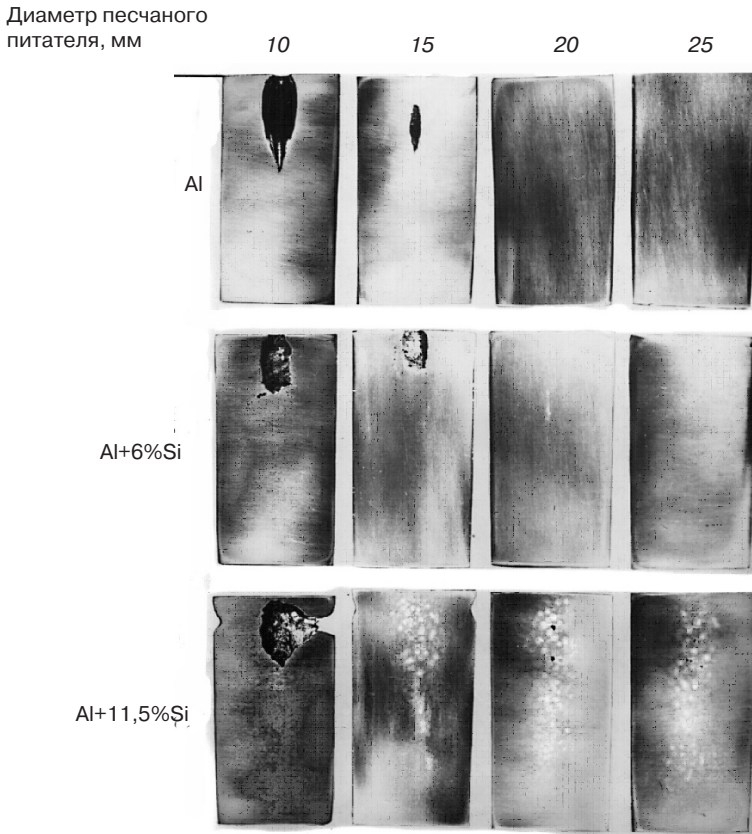


Рис. 8. Влияние диаметра песчаного питателя и материала отливки на наличие и характер усадочных дефектов

снаружи, предназначена для формирования исследуемого участка отливки высотой 150 мм. Верхняя тонкостенная часть формы выполняет роль прибыли. В ней жидкий металл сохраняется дольше, чем затвердевает отливка. В крышке 2, плотно прикрывающей форму сверху, выполнены три канала: через первый в центральную часть отливки установлена хромель-алюмелевая термопара 3, через второй полость формы может сообщаться либо с атмосферой, либо с источником сжатого воздуха, а через третий – с манометром 4. Собранная форма при комнатной температуре погружалась в тигель 5 с расплавом на глубину, при которой между крышкой и зеркалом металла оставался воздушный зазор высотой 10-15 мм (во время погружения полость формы сообщалась с атмосферой). По истечении заданного промежутка времени форму извлекали из тигля и над прибылью создавалось предусмотренное методикой исследования избыточное давление.

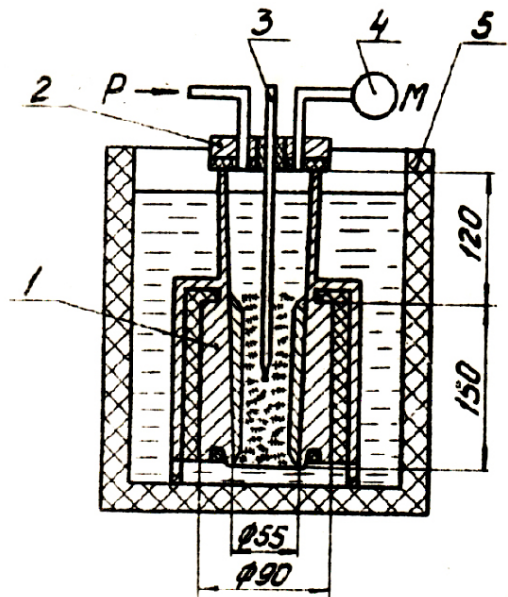
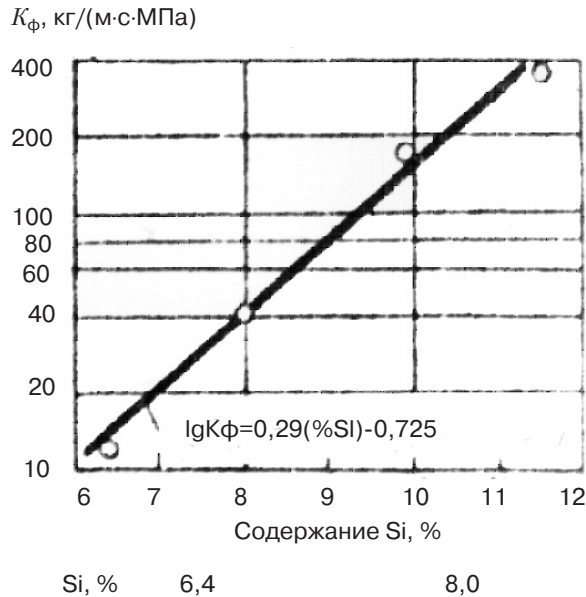


Рис. 9. Схема устройства для определения кинетики затвердевания и параметров фильтрационного питания отливки

## Затвердевание сплавов

Профильтровывавшаяся масса расплава собиралась на подложке, а затем взвешивалась. В процессе каждого опыта фиксировали время извлечения формы из тигля, время подачи давления, величина давления и момент прекращения фильтрации. С помощью потенциометра ЭПП09-М3 записывали кривую охлаждения. В качестве шихтовых материалов использовали алюминий А0, силумин СИЛ-0 и кремний кристаллический Кр1. Температуру заливки всех сплавов поддерживали в пределах 110-115 °С выше ликвидуса.

Согласно опытным данным, масса фильтрата находится в линейной зависимости от давления. Этим подтверждается возможность использования закона Дарси для двухфазных металлических систем, хотя при определённых условиях не исключены отклонения от этого закона из-за деформации кристаллического каркаса под действием давления и частичной закупорки питающих каналов твёрдой фазой, выделяющейся из расплава, поступающего для компенсации усадки.



Для компенсации усадки.

В процессе экспериментальных исследований установлено, что время прекращения фильтрации по отношению к времени полного затвердевания зависит от расхода фильтрата: чем этот расход больше, тем раньше прекращается фильтрация (от 5 до 25 с).

Определённые по данной методике коэффициенты фильтрации  $K_\phi$  (сверху) и соответствующие им структуры (внизу) представлены на рис. 10. Для приближённых расчётов может быть использована эмпирическая зависимость:

$$\lg K_\phi = 0,29 (\% \text{ Si}) - 0,725.$$

Экспериментально также установлено, что к концу затвердевания ряда сплавов значения коэффициента фильтрации существенно снижаются (рис. 11), что можно объяснить неравномерностью роста кристаллов.

Время образования связанного кристаллического каркаса по всему сечению отливки (рис. 12, кривая 5) определяли путём выдавливания из неё незатвердевшей сердцевинки под действием металлостатического напора 4 кПа. Каркас считался связанным, если его прочность была достаточной для сопротивления указанному напору.

Анализ экспериментальных данных показывает, что применительно к заэвтектическим сплавам разделение процесса формирования отливки на стадии свободного

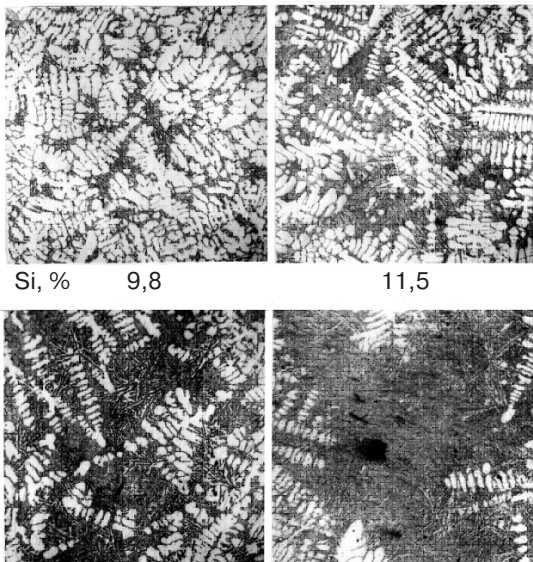


Рис. 10. Зависимость коэффициентов фильтрации и соответствующих им структур от содержания кремния в расплаве,  $\times 110$

## Затвердевание сплавов

и затруднённого питания является весьма условным, так как граница этого раздела в значительной мере зависит от металлостатического напора, под действием которого происходит выдавливание незатвердевшей сердцевины при установлении момента схватывания.

Благодаря отливкам, полученным при определении фильтрационных параметров, оказалось возможным визуально оценить деформационную способность кристаллического каркаса силуминов при фиксированном низком давлении (4 кПа) в зависимости от содержания кремния. Осевые темплеты отливок из сплавов, содержащих более 8 % Si, представлены на рис. 13. При более низких содержаниях кремния никаких следов деформации не наблюдалось, то есть прочность кристаллического каркаса была достаточной для сопротивления указанному давлению.

$K_{\phi}$ , кг/(м·с·МПа)

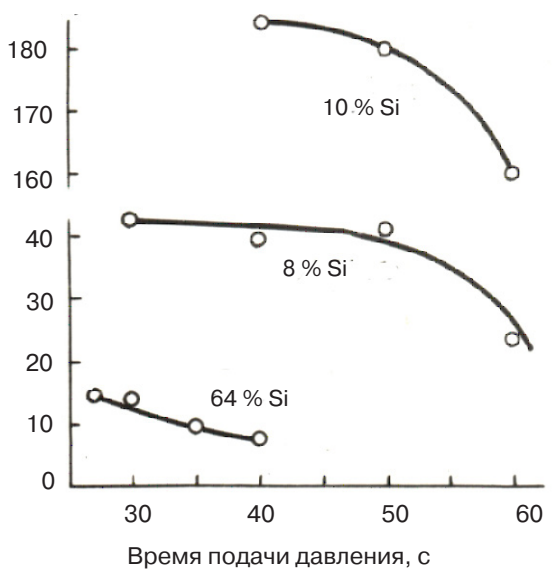


Рис. 11. Изменение коэффициентов фильтрации в процессе затвердевания доэвтектических силуминов

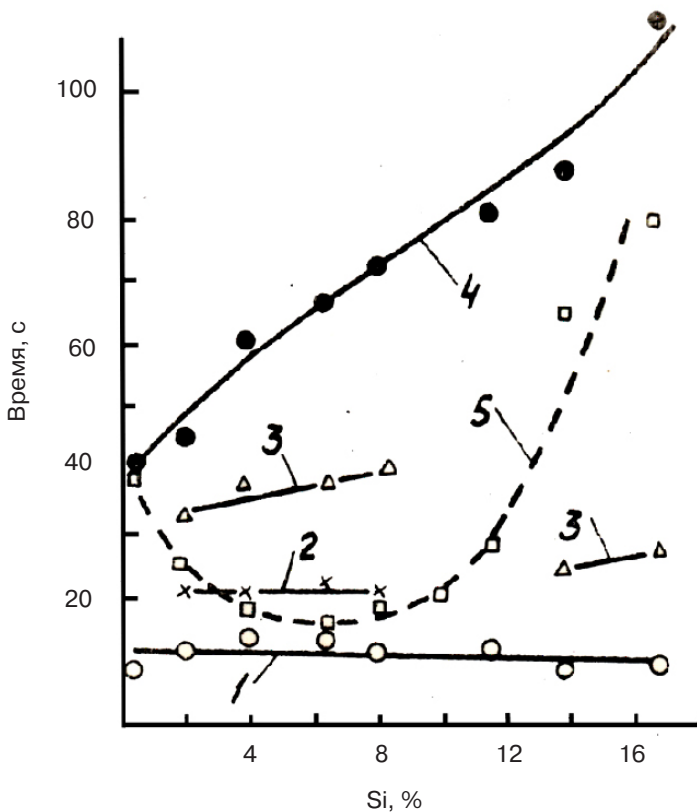


Рис. 12. Кинетика затвердевания (1 – снятие перегрева, 2 – окончание наличия температуры ликвидус, 3 – начало эвтектической кристаллизации, 4 – общая продолжительность затвердевания) и образование кристаллического каркаса по всему сечению отливки (5)

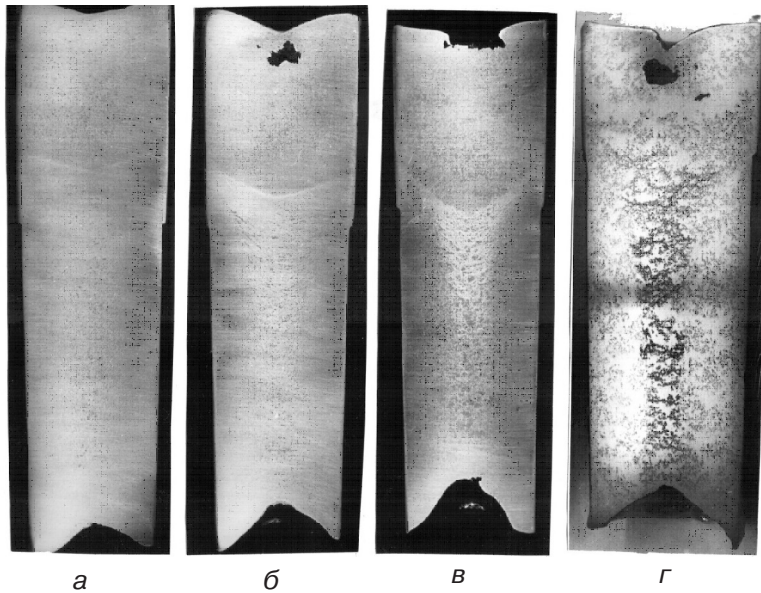


Рис. 13. Деформация кристаллического каркаса затвердевающей отливки под металлостатическим напором 4 кПа. Содержание кремния, %: а – 8; б – 10; в – 11,5; г – 17

По мере увеличения содержания кремния степень деформации на подприбыльных участках усиливалась, достигая максимума при эвтектическом и заэвтектическом составах, хотя из литературы [13-15] известно, что в бинарных силуминах с содержанием кремния более 8-9 % связанный кристаллический каркас не образуется. Здесь могут сказываться различные методики обнаружения кристаллического каркаса [16] и отличия исследованных сплавов от бинарных по химическому составу.

Вывод формулы для определения перепада давления  $\Delta P$ , обеспечивающего фильтрационное питание, в каждом конкретном случае будет зависеть от геометрии отливки и условий теплоотвода. В частности, для отливки типа пластины такая зависимость имеет вид [17] :

$$\Delta P = \frac{nK_3 h^2 \alpha \tau^{n-1} \rho_{ж}}{K_{\phi} (\delta - 2K_3 \tau^n)}$$

где  $n$  – показатель степени, отражающий закон роста твёрдой фазы;  $K$  – коэффициент затвердевания;  $\alpha$  – коэффициент объёмной усадки при затвердевании;  $h$  – протяжённость питаемого участка;  $\tau$  – время от начала затвердевания;  $\delta$  – толщина пластины;  $\rho_{ж}$  – плотность сплава в жидком состоянии;  $K_{\phi}$  – коэффициент фильтрации.

Согласно этой формуле для пластины толщиной 20 мм из сплава, содержащего 6,4 % Si ( $\tau_3 = 25$  с,  $K_3 = 2 \cdot 10^{-3}$  м·с<sup>-0,5</sup>,  $K_{\phi} = 12$  кг/(м·с·МПа),  $\alpha = 0,05$ ,  $n = 0,5$ ) через 20 с после начала затвердевания в сечении, удалённом от прибыли на расстояние 0,3 м, происходит падение давления в жидкой фазе до нуля. Возникшее внутри отливки разрежение может инициировать развитие процессов газовыделения, утяжки поверхности отливки и др.

Для условий направленного затвердевания отливки типа пластины в работе [6] рассмотрен один из возможных вариантов, когда рост твёрдой фазы подчиняется закону квадратного корня, а коэффициент затвердевания уменьшается в сторону прибыли по линейному закону, то есть  $K_3 = K_{30} - mh_{II}$ , где  $K_{30}$  – коэффициент затвердевания начального сечения;  $m$  – коэффициент направленности затвердевания;  $h_{II}$  – расстояние

## Затвердевание сплавов

от начального сечения. За начальное или нулевое сечение принято считать границу между затвердевшим и незатвердевшим участками отливки, то есть сечение, проходящее через наиболее удалённую от прибыли точку питающего канала (рис. 14, а).

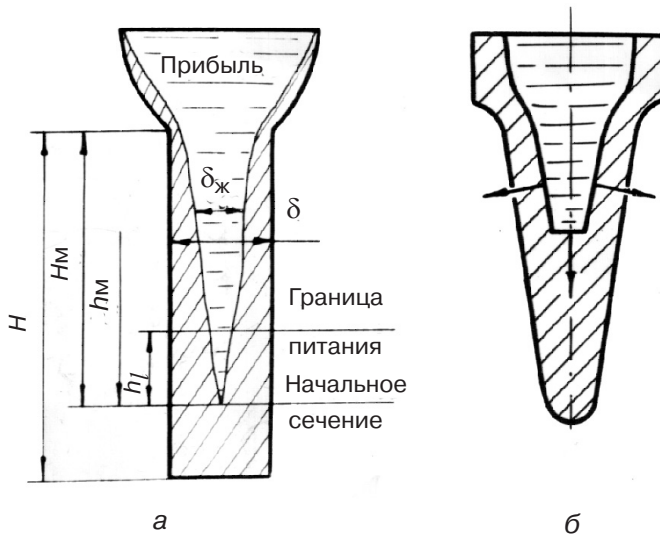


Рис. 14. Форма питающего канала направленно затвердевающей отливки без учёта (а) и с учётом (б) осевого теплоотвода

Наиболее затруднённые условия фильтрационного питания возникают после полного завершения формирования кристаллического каркаса, то есть при температуре эвтектики. Для этого случая требуемый перепад давлений может быть рассчитан по формуле :

$$\Delta P = \frac{\alpha K_{30}^2 h_n (4K_{30} - mh_n)}{2K_\phi m \delta^2}$$

Поскольку  $mh_n \leq K_{30}$ , им можно пренебречь, и тогда формула приводится к виду:

$$\frac{\Delta P m}{K_{30}^3} = \frac{2\alpha_3 h_n}{K_\phi \delta^2}$$

В правую часть этого выражения входят известные параметры, характеризующие материал и размеры отливки, поэтому она может рассматриваться как константа. Это говорит о том, что примерно одинаковые условия питания отливки достигаются при соблюдении:

$$\frac{\Delta P m}{K_{30}^3} = \text{const.}$$

Следовательно, в зависимости от возможностей того или иного способа литья недостаток давления может быть компенсирован улучшением направленности затвердевания, либо снижением интенсивности теплоотвода. С другой стороны, если повышение направленности затвердевания сопряжено со значительными трудно-

## Затвердевание сплавов

стями, можно идти по пути увеличения давления и снижения  $K_{30}$  в представленном соотношении.

Обычно питающий канал направленно затвердевающей отливки представляют в виде перевёрнутого остроконечного конуса [18, с. 165; 19, с. 397]. Автор данной статьи позаимствовал эту схему (рис.14, а) для аналитических исследований и получил результат, согласно которому большая часть перепада давлений тратится на питание острой конечности. В то же время в работе [7] показано, что на удалённом от прибыли затвердевшем и продолжающем охлаждаться участке создаётся продольный температурный градиент, а следовательно, и тепловой поток. Таким образом, в направленно затвердевающей отливке теплота кристаллизации отводится одновременно в поперечном направлении стенками формы и в продольном направлении затвердевшей частью, в результате чего питающий канал приобретает вид, представленный на рис.14, б, что значительно облегчает процесс питания.

В заключение предлагается перечень отличий изложенного материала от ранее выполненных исследований других авторов, представленных в обзоре работы [7]:

- механизм образования осевой V-образной ликвации в момент завершения образования в осевой зоне отливки междендритных связей, возникновение продольного перепада давлений, разрушающего эти связи и деформирующего наиболее слабые центральные слои твёрдо-жидкой массы в сторону питания;
- механизм образования внеосевой  $\Delta$ -образной ликвации в твёрдо-жидкой сердцевине отливки после повышения концентрации твёрдой фазы и прочности каркаса в осевой зоне, когда создаются условия для сдвига более удалённых от оси слоёв, поскольку в это время при одном и том же напоре сдвиговые напряжения линейно возрастают с увеличением радиуса зоны двухфазного состояния, деформация сдвига произойдёт на таком расстоянии от оси, где значения сдвиговых напряжений превысят прочность кристаллического каркаса;
- частичная или даже полная закупорка междендритных питающих каналов в подприбыльной части отливки с продольным температурным градиентом в результате избирательной кристаллизации опускающейся из прибыли питающей фазы с выделением тугоплавкой составляющей;
- механизм образования более глубоких утяжин на цилиндрических поверхностях по сравнению с рядом расположенными менее жёсткими плоскими поверхностями: деформация цилиндрической корочки сопровождается не растяжением, как это имеет место при деформации плоской, а изгибом, что требует меньших усилий;
- интересны и полезны в практическом плане исследования и рекомендации по получению разностенных силуминовых отливок;
- методика определения фильтрационных параметров (коэффициент фильтрации, время образования связанного кристаллического каркаса) в условиях, приближённых к реальному затвердеванию силуминовых отливок;
- зависимость времени прекращения фильтрационного питания от расхода фильтра;
- экспериментально установленный факт уменьшения коэффициента фильтрации на стадии эвтектического затвердевания при, казалось бы, неизменном кристаллическом каркасе;
- установление компенсирующего соотношения между давлением, направленно затвердевания и коэффициентом затвердевания при обеспечении питания направленно затвердевающей отливки;
- учёт осевого теплоотода затвердевшей частью направленно затвердевающей отливки, существенно изменяющего форму питающего канала и облегчающего процесс питания, что должно приниматься во внимание при технологических работах процессов получения силуминовых отливок.



### Список литературы

1. Рыжиков А. А. Теоретические основы литейного производства / А. А. Рыжиков. – М.: Свердловск: Машгиз, 1961. – 447 с.
2. Баландин Г. Ф. Основы теории формирования отливки / Г. Ф. Баландин. – М.: Машиностроение, 1976. – 328 с.
3. Бондарев В. А. Связь диаграммы состояния и условий питания отливки / В. А. Бондарев, А. И. Вейник // Литейные свойства металлов и сплавов. – М.: Наука, 1967. – С.173-178.
4. Фокин В. И. Процессы питания и образования зональной ликвационной неоднородности в стальных отливках / В. И. Фокин // Повышение качества отливок и слитков. Горький. – 1979. – № 1. – С.18-21.
5. Тимофеев Г. И. Механика сплавов при кристаллизации слитков и отливок / Г. И. Тимофеев. – М.: Metallurgiya, 1977. – 160 с.
6. Котлярский Ф. М. Процессы образования и методы снижения физической и химической неоднородности отливок из алюминиево-кремниевых сплавов. Дис... д.т.н. – Киев.: ИПЛ АН УССР, 1991. – 438 с.
7. Котлярский Ф. М. Формирование отливок из алюминиевых сплавов / Ф. М. Котлярский. – Киев.: Наукова думка, 1990. – 216 с.
8. Отчёт по теме НИР 1.6.5.432. Исследование механики развития деформационных процессов в затвердевающей отливке. – Киев: ФТИМС НАНУ. – 2001. – 288 с.
9. Котлярский Ф. М. Исследование процесса формирования отливок из алюминиево-кремниевых сплавов в зависимости от условий питания. Дис... канд. техн. наук.- Киев: ИПЛ АН УССР, 1975. – 216 с.
10. Котлярский Ф. М. Исследование влияния тепло-силовых условий затвердевания на процесс формирования отливок из алюминиевых сплавов / Ф. М. Котлярский, Г. П. Борисов. – Киев, 1979. – 28 с. (Препринт/ АН УССР. Ин-т проблем литья).
11. Магницкий О. Н. Влияние условий затвердевания на формирование усадочных раковин в стальных отливках / О. Н. Магницкий, Б. Б. Гуляев // Усадочные процессы в металлах. – М.: АН СССР, 1960. – С.19-31.
12. Котлярский Ф. М. Водород в алюминиевых сплавах и отливках: монография / Ф. М. Котлярский. – Киев: Освіта України, 2011. – 208 с.
13. Бочвар А. А., Новиков Н. Н. О твердожидком состоянии сплавов разного состава в период их кристаллизации / А. А. Бочвар, Н. Н. Новиков // Изв. АН СССР. ОТН. – 1952. – № 2. – С. 217-233.
14. Гуляев Б. Б. Литейные процессы / Б. Б. Гуляев. – М.: машгиз, 1960. – 416 с.
15. Бахтиаров Р. А. О зависимости величины усадочной пористости в отливках от положения сплава на диаграмме состояния / Р. А. Бахтиаров // Изв. АН СССР. ОТН. Metallurgiya и топливо. – 1962. – № 4. – С. 62-69.
16. Котлярский Ф. М. О состоянии двухфазной области кристаллизующихся силуминов / Ф. М. Котлярский, Г. П. Борисов // Процессы литья. – 2006. – №1. – С. 22-25.
17. Котлярский Ф. М. Особенности фильтрационного питания отливок из алюминиевых сплавов / Ф. М. Котлярский, Г. П. Борисов // Литейн. про-во. – 1986. – № 5. – С. 4-6.
18. Пржибыл Й. Теория литейных процессов / Й. Пржибыл. – М.: Мир, 1967. – 328 с.
19. Вейник А. И. Теория затвердевания отливки / А. И. Вейник. – М.: Машгиз, 1960. – 436 с.



### References

1. Ryzhikov A. A. Teoreticheskie osnovy litejnogo proizvodstva. M.-Sverdlovsk: Mashgiz, 1961, 447 p. [in Russian].
2. Balandin G. F. Osnovy teorii formirovaniya otlivki. Moscow: Mashinostroenie, 1976, 328 p. [in Russian].

3. Bondarev V. A., Vejnik A. I. Svjaz' diagrammy sostojanija i uslovij pitanija otlivki. Litejnye svojstva metallov i splavov. Moscow: Nauka, 1967, pp. 173-178 [in Russian].
4. Fokin V. I. Processy pitanija i obrazovanija zonal'noj likvacionnoj neodnorodnosti v stal'nyh otlivkah. Povyshenie kachestva otlivok i slitkov. - Gor'kij. 1979, № 1, pp. 18-21 [in Russian].
5. Timofeev G. I. Mehanika splavov pri kristallizacii slitkov i otlivok. Moscow: Metallurgija, 1977, 160 p. [in Russian].
6. Kotljarskij F. M. Processy obrazovanija i metody snizhenija fizicheskoj i himicheskoj neodnorodnosti otlivok iz aljuminievo-kremnievyh splavov. Dissertacija d.t.n. Kyiv: IPL AN USSR, 1991, 438 p. [in Russian].
7. Kotljarskij F. M. Formirovanie otlivok iz aljuminievyh splavov. Kyiv: Naukova dumka, 1990, 216 p. [in Russian].
8. Otchet po teme NIR 1.6.5.432. Issledovanie mehaniki razvitija deformacionnyh processov v zatverdevajushhej otlivke. Kiev: FTIMS NANU, 2001, 288 p. [in Russian].
9. Kotljarskij F. M. Issledovanie processa formirovanija otlivok iz aljuminievo-kremnievyh splavov v zavisimosti ot uslovij pitanija. Dissertacija kand. tehn. nauk. Kiev: IPL AN USSR, 1975, 216 p. [in Russian].
10. Kotljarskij F. M., Borisov G. P. Issledovanie vlijanija teplo-silovyh uslovij zatverdevanija na process formirovanija otlivok iz aljuminievyh splavov. Kiev, 1979, 28 p. (Preprint/ AN USSR. In-t problem lit'ja) [in Russian].
11. Magnickij O. N., Guljaev B. B. Vlijanie uslovij zatverdevanija na formirovanie usadochnyh rakovin v stal'nyh otlivkah // Usadochnye processy v metallah. Moscow: AN SSSR, 1960, pp. 19-31 [in Russian].
12. Kotljarskij F. M. Vodorod v aljuminievyh splavah i otlivkah: monografija. Kyiv: Osvita Ukraïni, 2011, 208 p. [in Russian].
13. Bochvar A. A., Novikov N. N. O tverdozhidkom sostojanii splavov raznogo sostava v period ih kristallizacii. Izv. AN SSSR. OTN. 1952, № 2, pp. 217-233 [in Russian].
14. Guljaev B. B. Litejnye processy. Moscow, mashgiz, 1960, 416 p. [in Russian].
15. Bahtiarov R. A. O zavisimosti velichiny usadochnoj poristosti v otlivkah ot polozhenija splava na diagramme sostojanija. Izv. AN SSSR. OTN. Metallurgija i toplivo. 1962, № 4, pp. 62-69 [in Russian].
16. Kotljarskij F. M., Borisov G. P. O sostojanii dvuhfaznoj oblasti kristallizujushhhsja siluminov. Processy lit'ja, 2006, № 1, pp. 22-25 [in Russian].
17. Kotljarskij F. M., Borisov G. P. Osobennosti fil'tracionnogo pitanija otlivok iz aljuminievyh splavov. Litejnoe proizvodstvo, 1986, № 5, pp. 4-6 [in Russian].
18. Przhibyl J. Teorija litejnyh processov. Moscow: Mir, 1967, 328 p. [in Russian].
19. Vejnik A. I. Teorija zatverdevanija otlivki. Moscow: Mashgiz, 1960, 436 p. [in Russian].

Поступила 09.11.2015