
ЗАТВЕРДЕВАНИЕ СПЛАВОВ

УДК 621.746:669.715

Ф. М. Котлярский, д-р техн. наук, ст. науч. сотр.

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

СУЩЕСТВУЮЩИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ГАЗОУСАДОЧНЫХ ДЕФЕКТАХ В ОТЛИВКАХ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Представлены различные точки зрения на механизмы образования газовых и усадочных дефектов в отливках из алюминиевых сплавов, а также меры борьбы с ними с учетом ресурсосбережения.

Ключевые слова: *алюминиевые сплавы, отливки, газоусадочные дефекты, свойства, ресурсосбережение.*

Наведено різні точки зору про механізми утворення газових та усадочних дефектів у виливках з алюмінієвих сплавів, а також заходи боротьби з ними з урахуванням ресурсозбереження.

Ключові слова: *алюмінієві сплави, виливки, газоусадочні дефекти, властивості, ресурсозбереження.*

The different points of view on the mechanisms of formation of gas and shrinkage defects in the castings of aluminum alloys, as well as measures of their elimination, taking into account resource saving are presented.

Keywords: *aluminum alloys, castings, gas-tight defects, properties, resource-saving.*

Вопросы, касающиеся формирования и роли газоусадочных дефектов в отливках из обычных [1, 2, 3], высокопрочных [4, 5] и деформируемых [6] алюминиевых сплавов, рассматриваются в соответствующих литературных источниках вне зависимости от предназначения сплавов и уровня их прочности, что расширяет круг полезной информации.

Во всех жидких алюминиевых сплавах, в том числе рафинированных, всегда есть растворенный водород, который выделяется в любую полость, образовавшуюся внутри затвердевающей отливки. Поэтому многие авторы известных работ не разделяли эти полости на усадочные и газовые. Так, например, Б. Чалмерс полагал, что нет смысла различать пористость, возникшую в результате усадки и за счет выделения газов, так как получающиеся в этих случаях дефекты имеют одинаковый характер [7, с. 272]. По мнению Б. Б. Гуляева реальная пористость всегда имеет смешанный газоусадочный характер [2, с. 149]. В. И. Добаткин с соавторами считают разделение пористости усадочного и газового происхождения условным [6, с. 98]. Однако, несколько позже в работе [8] было показано, что природа усадочных или газовых дефектов определяется знаком напряженного состояния расплава. Если

в металлоемком узле отливки после прекращения питания выделяющегося из расплава газа достаточно для поддержания положительного давления, образуется преимущественно рассредоточенная газовая пористость; если же газа недостаточно, то под действием усадки возникает отрицательное давление с разрывом расплава на наиболее крупном или менее смачиваемом твердом включении и образованием концентрированной усадочной раковины. Поэтому в условиях недостаточного питания рафинированные сплавы склонны к образованию сообщающихся усадочных дефектов типа концентрированных раковин, трещин, рыхлот и утяжин, являющихся обычно причиной брака по негерметичности и нарушению геометрии, тогда как повышение газосодержания расплава приводит к устранению указанных дефектов [8].

1. Внутренние усадочные дефекты

При производстве сложного фасонного литья пористость считают неизбежным элементом макроструктуры [9]. Из выполненных в работе [10] расчетов также следует, что получение плотной отливки невозможно. Для отливок, получаемых полностью в металлических или полностью в песчаных формах, наиболее характерна осевая усадочная пористость [11]. Без осевой пористости отливок нет. В задачу литейщика входит изготовить отливку с минимальной осевой пористостью [1].

1.1. Происхождение внутренних усадочных дефектов

Причиной образования осевой пористости является смыкание двухфазных зон и несогласованность скоростей роста кристаллов и фильтрации расплава между этими кристаллами [3, 10]. Наиболее простым случаем осевой усадочной пористости считают пористость в слитке или в плоской стенке отливки [11]. В процессе послыонного затвердевания область жидкого металла, сообщающаяся с прибылью, непрерывно сужается. Объем канала, по которому протекает питающий отливку жидкий металл, постепенно достигает такого значения, при котором сильно возрастает сопротивление движению металла, что затрудняет питание отливки. В результате некоторые участки отливки затвердевают раньше, чем произойдет заполнение появившихся пустот, поэтому образуются усадочные осевые поры [11, 12]. Приведенные в этих работах расчеты показывают, что для отливок, имеющих толщину от 10 до 40 мм, зона осевой пористости составляет от 0,5 до 5 мм, что примерно совпадает с опытными данными. Для отливок более массивных или отливок из сплавов с более широким интервалом кристаллизации эта зона будет больше.

На основании анализа экспериментальных исследований А. А. Рыжиков приходит к выводу, что осевая рыхлость в отливке возникает в результате своеобразного «засорения» устья прибыли и подприбыльной зоны оседающими кристаллами. Прибыль подает в отливку чистый расплав, который идет на питание подприбыльного участка. Далее расположенные участки отливки питаются расплавом, обогащенным ликватами. Поэтому возможно более быстрое затвердевание подприбыльного участка, несмотря на направленность температурного градиента в сторону прибыли, с образованием ликвационной неоднородности, усадочной пористости и усадочных раковин.

В работе [13] исследовали процесс формирования протяженной равностенной отливки при нижнем расположении питающего узла, когда «оседание кристаллов в подприбыльную зону отливки» невозможно. Однако и в этом случае имело место «засорение» этой зоны. Установлено, что главным фактором «засорения» является наличие в зоне сопряжения отливки с питающим узлом продольного перепада температуры. Перемещение питающего расплава через эту зону сопровождается выделением соответствующей температуре тугоплавкой составляющей, что и приводит к частичной или полной закупорке питающих каналов.

Рассеянная усадочная пористость образуется по всему сечению отливки в результате усадки при затвердевании микроскопического объема жидкого металла, обособленного неравномерно растущими дендритами [2, 4–6, 10]. Есть и другая точка зрения: ветви дендритов не могут образовать сплошного непроницаемого слоя, но если бы они его и образовали, то под действием возникающего в результате усадки

перепада давлений он бы разрушился [14–17], о чем свидетельствует наличие беспористых участков отливок, затвердевших в условиях фильтрационного питания [3].

В поддержку этой точки зрения можно сослаться на утяжины, при образовании которых тело отливки самоуплотняется за счет деформации не только ветвей дендритов, но и полностью затвердевшей корочки. В работе [13] описан эксперимент, в котором при получении из сплава Al+6%Si полуцилиндрических отливок радиусом 25 и длиной 70 мм с уменьшением сечения питателя нескомпенсированная прибылью усадка выражалась только увеличением утяжины, тогда как плотность оставалась практически неизменной.

Что касается разрушения дендритов, то в этой же работе на отливках диаметром 50 и высотой 400 мм из того же сплава исследовали механизм возникновения цепочки осевых усадочных раковин путем заливки в образующуюся сверху воронку расплава соли ($50\%NaNO_3 + 50\%KNO_3$). Анализ продольных и поперечных сечений опытных отливок показал, что соль заполнила практически все усадочные пустоты на глубину 280 мм от верхнего торца. Это является прямым подтверждением того, что осевые раковины сообщаются между собой сплошным каналом, а разделяющие их мосты лишь в продольном сечении кажутся сплошными. Зарождение канала происходит в верхней усадочной воронке под действием сил атмосферного давления и усадочного разрежения внутри затвердевающей отливки в момент образования сплошного кристаллического каркаса (смыкание поверхностей выливаемости). В дальнейшем этот канал проникает вглубь отливки и завершает свое продольное развитие в момент прекращения усадки нижележащих слоев металла, то есть в момент окончания их затвердевания.

Однако, как показано теоретически и подтверждено экспериментально в работе [8], так бывает обычно при литье сплавов, хорошо очищенных от водорода, когда после отделения от узла питания давление в расплаве под действием усадки вначале понижается до нуля, а затем становится отрицательным, что и является условием появления разрывных усилий. В случае литья неочищенных или специально наводороженных сплавов из-за выделения достаточного количества газов возможно лишь снижение давления, которое будет оставаться положительным до окончания затвердевания, поэтому разрыва не произойдет.

С увеличением скорости затвердевания, то есть с уменьшением толщины отливки, переходом от песчаной формы к металлической, пористость возрастает [2, 3, 5, 10], что связано с увеличением расхода питающей фазы. То же самое происходит при увеличении протяженности питания отливки [2].

В числе факторов, отрицательно влияющих на процесс питания, называют твердые неметаллические включения [11], пузырьки газа [18], температурный интервал кристаллизации [2, 4, 5, 11]. В период формирования зоны равноосных кристаллов питание также оказывается недостаточным и сплав получается пористым и негерметичным [3].

Усадочные раковины представляют собой относительно большие пространства, расположенные в тепловых центрах отливки [2–4]. Такие центры могут образовываться вблизи подвода литника [2]. При кокильном литье размеры усадочных раковин всегда больше, чем при литье в разовые формы [3].

Механизмы образования усадочных раковин и рыхлот описаны в работе [8]. После прекращения питания какого-то участка отливки прибылью давление в расплаве на этом участке под действием усадки становится отрицательным и достигает такого значения, при котором происходит разрыв расплава в наиболее слабом месте. В момент разрыва отрицательное давление падает практически до нуля, а место разрыва как бы выполняет роль прибыли по отношению к другим участкам отливки, обладающим сравнительно большей объемной прочностью. Форма образующейся при этом полости зависит от консистенции окружающей массы металла. Если в жидкой или в жидкотвердой массе полость всплывает в верхнее положение и сохраняется в более или менее компактном виде, то в твердожидком сплаве она чаще

приобретает форму разветвленной трещины. Этому способствуют возникающие на поверхности разрыва в междендритных ячейках капиллярные силы, которые препятствуют оголению кристаллического каркаса жидкой фазой, из-за чего под действием усадки происходит смещение всей образовавшейся поверхности и развитие трещины. Чем мельче междендритные ячейки при равной концентрации твердой фазы и выше поверхностное натяжение расплава, тем больше капиллярные силы и тем вероятнее образование сообщающихся трещин и раковин. Изменение указанных параметров в обратном направлении приведет к тому, что капиллярные силы окажутся недостаточными для деформации кристаллического каркаса и жидкая фаза сможет перемещаться между дендритами, не разрушая их, то есть вместо трещин возникнут сообщающиеся междендритные поры, так называемая рыхлота.

1.2. Влияние внутренних усадочных дефектов на свойства отливки

В зоне концентрированных усадочных дефектов определять механические свойства бессмысленно, поскольку из этой зоны даже образцы вырезать невозможно, и такая отливка обычно бракуется из-за низкой прочности и негерметичности [3]. Это касается и осевой усадочной пористости, особенно после обработки резанием [10].

Поры снижают в первую очередь удлинение. Удаление пор даст возможность получать литые детали, не уступающие по механическим свойствам кованным [11].

Для алюминиевых сплавов выделить усадочную пористость на фоне газовой пористости проблематично. Это отчетливо показано в работе [19], где большой объем исследований по формированию непропитываемых узлов в отливке выполнен на специально разработанных пробах в виде цилиндра диаметром 90 мм, сообщающегося с массивной прибылью посредством питателя диаметром 32 мм. Обычно фиксировали либо концентрированные усадочные раковины, либо газовую пористость, либо сочетание того и другого. Тем не менее, в работе [13] описан эксперимент, решающий эту задачу. Отливки из сплавов Al+6 % Si и Al+12 % Si в виде перевернутого усеченного конуса высотой 168 и диаметрами оснований 67 и 50 мм в металлической форме сообщались с прибылью питателями с приведенной толщиной 4,5, 7,6, 12 и 17 мм. Последний размер равен приведенной толщине верхней части отливки, и только в этом случае отливка была плотной без каких-либо дефектов (перегрев расплава 80–90 °С). При первых двух питателях в отливках всегда образовывались крупные усадочные концентрированные раковины, свидетельствующие о том, что содержание водорода в расплаве недостаточно для создания положительного давления в процессе затвердевания. И только при питателе с приведенной толщиной 12 мм раковин не наблюдалось, а гидростатическое взвешивание фиксировало около 3 % пористости, которую можно считать усадочной.

Для проведения механических испытаний из средней по высоте части отливок вырезали по три стандартных образца диаметром 8 мм (из слоя металла, прилегающего к осевому сечению). Оказалось, что по сравнению с плотной отливкой 3 % усадочной пористости снизили прочность на 20 % у сплава Al+6%Si (с 140 до 110 МПа) и на 17 % у сплава Al+12%Si (с 210 до 174 МПа). Пластичность для первого сплава снизилась почти в 3 раза (с 14 до 5 %), для второго сплава практически не изменилась (около 12 %).

Возможна еще одна разновидность усадочной пористости, возникающей при отрицательном давлении в результате увеличения объема газа, занимающего несплошности твердых неметаллических включений [20]. В отличие от классической сообщающейся пористости (рыхлоты) в данном случае получают разобщенные поры из упруго растянутых пузырьков газа. Однако такая пористость возможна только при небольшой усадке, пока на одном из пузырьков не произойдет разрыв расплава. В этот момент величина отрицательного давления резко падает, и все остальные пузырьки сокращаются в объеме за счет роста разорвавшегося [21]. В итоге получается концентрированная раковина.

Расчетами показано, чем медленнее затвердевает отливка, тем вероятнее получение положительного результата. В работе [22] из сплавов Al+6%Si и Al+12%Si без

какой-либо обработки отливали непротитываемые технологические пробы в кокиль с исходной температурой 25, 250 и 400 °С. Только в последнем случае утяжины отсутствовали, а вырезанные пластины толщиной 5 мм успешно прошли проверку на герметичность под давлением 0,5 МПа. Размеры внутренних пор не превышали 0,5 мм.

1.3. Устранение внутренних усадочных дефектов

Главным условием предупреждения образования внутренних усадочных дефектов является направленное затвердевание отливки [1–4, 11, 13]. Организацию направленности затвердевания можно начинать еще в процессе заливки. Идеальным считают увеличение времени заливки до времени затвердевания отливки [11, 23, 24], особенно при высокой температуре расплава [25, 26]. Однако для сплавов с большим интервалом кристаллизации (AlMg5) более благоприятна быстрая заливка сверху [27]. Для спокойной заливки сверху используют многоручьевые или щелевые дождевые литники [28, 29]. Другими специальными литниковыми системами, способствующими направленности затвердевания отливки, являются: подвод металла под прибыль [23, 30], вертикально-щелевая [11], комбинированная [31], поднимающаяся по мере заполнения формы чаша с трубкой [32–34], заливка с поворотом формы [11, 26, 28, 32, 35].

Можно управлять процессом затвердевания отливки изготовлением комбинированных форм из нескольких материалов с отличающимися теплофизическими свойствами [2, 23, 26, 30, 33, 35], нанесением на поверхность металлической формы теплоизоляционного покрытия переменной толщины [11, 36], изменением толщины стенки формы [36, 37], созданием продольного температурного градиента формы [2, 38], раскрытием частей формы и регулированием искусственного зазора [36], подачей хладагента в зазор между отливкой и формой [39, 40].

Наиболее эффективным и надежным средством борьбы с усадочной пористостью являются напуски, то есть постепенное увеличение толщины стенки отливки по направлению к питающему узлу [2, 11, 26, 30]. Заслуживает внимания разработанный в ФТИМС НАН Украины способ ускорения процесса затвердевания отливки путем регулирования перепада давлений в зоне контакта отливки с формой [13, 41].

Важным элементом питания отливки является прибыль. В ней должно быть достаточно расплава для компенсации усадочной раковины в отливке, а также обеспечения достаточной продолжительности ее затвердевания для сохранения бассейна жидкого металла до конца затвердевания отливки [2, 3]. Для лучшей работы прибыли осуществляют ее доливку горячим металлом или делают их отводными, чтобы оседающие кристаллы не «засоряли» ближние участки отливки [11].

Район воздействия прибыли на осевую пористость ограничен; она устраняется полностью лишь на расстояние 1,5–2 толщины стенки отливки. Некоторое ослабление пористости наблюдается на расстоянии до 5–7 толщин [2].

При алюминиевом литье во многих случаях прибыли не оправданы, целесообразно применять ускоренное охлаждение [3], использовать холодильники (особенно в утолщениях и сопряжениях), сочетание местных напусков и холодильников, ограничивающих зоны питания прибылей [1, 3].

Пористость может быть уменьшена или устранена путем приложения на прибыль или на внешние стенки отливки давления, ударной вибрации [2, 3, 11], эффективен рассредоточенный подвод расплава в форму [4].

2. Внешние усадочные дефекты – утяжины

После прекращения связи с прибылью или при недостаточном поступлении питающей фазы в металлоемком узле либо на удаленном от прибыли участке отливки под действием усадки начинается понижение внутреннего давления, то есть между внутренней частью затвердевающей отливки и окружающей средой (атмосферой) возникает перепад давлений. Если этого перепада достаточно для деформации поверхностного слоя отливки (в твердом или твердожидком состоянии), происходит прогиб этого слоя внутрь отливки, то есть образуется утяжина [13, 42]. Ее развитие

будет продолжаться и после перехода положительного давления внутри отливки в отрицательное. Прекращение этого процесса произойдет либо в момент достаточного упрочнения затвердевшей корочки, либо из-за разрыва расплава в наиболее слабом месте, либо из-за повышения давления со стороны прибыли, либо из-за понижения внешнего давления [13, 43]. При большой стреле прогиба образуются трещины, уходящие вглубь отливки.

2. 1. Факторы, определяющие размеры и расположение утяжин [7, 12–21, 42–45]

Состав сплава. Сплавы Al–Si с содержанием кремния до 17 %. На клинообразных и цилиндрических пробах установлено, что наиболее склонны к утяжке доэвтектические сплавы, содержащие 6–9 % Si. При отклонении этого состава в ту или иную сторону объем утяжин резко падает. На полуцилиндрических пробах проявилась крайняя противоположность между доэвтектическим сплавом с 6 % Si и заэвтектическим сплавом с 15 % Si. Если для первого изменение сечения питателя сказывается лишь на объеме утяжин, а плотность остается постоянной, то для другого имеет место обратная картина – деформация поверхности отсутствует, а недостаток питания сказывается только на плотности. Примерно то же демонстрируют осевые сечения цилиндрических проб: концентрированные раковины при отсутствии утяжки для чистого алюминия и наличие утяжки при отсутствии видимых внутренних дефектов для сплава с 5,5 % Si. На остальных сечениях наблюдается сочетание рассредоточенных внутренних дефектов со значительной (при 3 % Si) и незначительной (при 8,5 и 11,5 % Si) утяжкой. Чем больше суммарный объем внутренних усадочных пустот, тем меньше утяжка и наоборот.

Особенности технологии и конфигурация поверхности отливки. При получении протяженной полуцилиндрической отливки под низким давлением в кокиль 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 утяжин. Причем утяжины образуются как со стороны плоской поверхности, так и со стороны цилиндрической. Несмотря на то, что цилиндрическая корочка более жесткая, чем плоская, в ряде случаев более глубокие утяжины образуются со стороны цилиндрической поверхности. Объясняется это следующим образом. Вначале прогибается плоская поверхность, но по мере увеличения стрелы прогиба силы реакции возрастают и при определенной степени деформации величина напряжений может оказаться достаточной для преодоления жесткости корочки со стороны цилиндрической поверхности. Деформация цилиндрической корочки в сторону ее 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 счет прогиба цилиндрической поверхности.

Таким образом, приведенные данные свидетельствуют о том, что литью под низким давлением и другим сходным методам литья, у которых заполнение форм расплавом и питание отливок осуществляется снизу, присущ характерный недостаток, состоящий в том, что наиболее удаленная от металлопровода верхняя часть формы заполняется в последнюю очередь, поэтому в протяженной отливке здесь возможно образование теплового центра и утяжин.

Скорость охлаждения отливки. В работе [46] доказан экстремальный характер влияния скорости охлаждения отливки на образование утяжин с максимумом при средней интенсивности охлаждения. При быстром охлаждении этот процесс сдерживается благодаря наличию в питателе жидкой прослойки практически до окончания его затвердевания, а при медленном – в результате малого расхода питающей фазы и соответственно низкого перепада давлений.

Рафинирование расплава. Чем ниже содержание водорода в расплаве, тем интенсивнее развивается процесс утяжки [13]. В частности, при снижении содер-

Затвердевание сплавов

жания водорода от 0,8–1,1 до 0,2–0,3 см³/100 г объем утяжин в технологических пробах увеличивается для доэвтектического силумина (6 % Si) с 0,86 до 2,54 см³, а для заэвтектического силумина (15 % Si) с 0,45 до 0,83 см³, то есть эффект зависит от состава сплава.

Преждевременное схватывание прибыли. Возникающие в междендритных ячейках на открытой поверхности прибыли капиллярные силы препятствуют опусканию питающей жидкости и создают внутри отливки дополнительное разрежение. Эксперименты, выполненные в работе [13] на образцах со специально уменьшенными прибылями или вовсе без прибылей, подтвердили существенное увеличение объема утяжин под воздействием этого фактора. В этой же работе экспериментально доказано, что при определенных условиях уже в начальной стадии фильтрационного питания возникают усилия, достаточные для прогиба плоской корочки, затвердевшей к данному времени. При получении из сплава АЛ2 в кокиле пластины 30x105x115 мм при отсутствии прибыли объем утяжин на боковой поверхности составил 7 см³, а при наличии утепленной асбестом прибыли этот объем уменьшился вдвое.

Конструкция отливки. Утяжины зачастую возникают во внутренних углах сопряженных элементов из-за более медленного затвердевания [35, 47]. Экспериментально установлено [47], что глубина утяжины увеличивается с уменьшением радиусов закругления и с уменьшением соотношения толщин сопрягаемых стенок. Последнее авторы объясняют тем, что при быстром затвердевании одной из сопрягаемых стенок ухудшается питание узла в целом.

Интервал кристаллизации. По мнению А. А. Бочвара [48], кристаллизующиеся в узком интервале и образующие прочную сплошную корку сплавы очень быстро прекращают поддаваться воздействию атмосферного давления, поэтому наружная усадка в них незначительна. В сплавах, затвердевающих в широком интервале температур, длительно поддерживается полутвердое-полужидкое кашеобразное состояние корки. В момент образования внутри отливки усадочного разрежения такая корка оказывается недостаточно прочной и легко деформируется.

Совершенно противоположной точки зрения придерживаются авторы работы [49]. По их данным, полученным при производстве отливок из алюминиевых сплавов с использованием щелевых питателей, вероятность появления макродефектов на поверхности отливки тем ниже, чем больше интервал кристаллизации сплава. Они приходят к выводу, что применительно к сплавам с узким интервалом кристаллизации, способным образовывать у стенки формы твердую корку, следует обеспечивать по возможности более значительное перемерзание питателя, тогда как по отношению к сплавам с широким интервалом кристаллизации нет необходимости в таких мероприятиях.

2.2. Влияние утяжин на качество отливки [13]

При литье алюминиевых сплавов утяжины – весьма распространенный порок, резко снижающий качество литых изделий и увеличивающий процент брака. Локальная деформация поверхности, особенно на необрабатываемых участках, нарушает геометрическую и размерную точность, ухудшает товарный вид отливки, а возникающие при этом трещины отрицательно сказываются на герметичности и механических свойствах литого металла. В зоне утяжки из-за местного уплотнения кристаллического каркаса в центральном слое отливки возможно изменение химического состава сплава, а из-за образования между затвердевающей отливкой и формой значительного зазора нарушается тепловой режим охлаждения отливки, особенно направленности затвердевания, что повлечет за собой и другие дефекты, а также увеличится продолжительность затвердевания, что снизит производительность.

2.3. Устранение утяжин

Главной мерой борьбы с утяжинами является организация направленности затвердевания отливки, то есть обеспечение нормального питания, исключая понижение внутреннего давления, особенно на начальной стадии кристаллизации [32, 49–51]. Возможны мероприятия, упрочняющие поверхностную корочку

Затвердевание сплавов

(например, интенсификация тепловода [49], увеличение радиусов закругления [47], использование сплавов, малочувствительных к утяжке (например, заэвтектические силумины [13])). При литье под низким давлением существенное уменьшение утяжки может быть достигнуто путем повышения температуры расплава, скорости заливки и избыточного давления [13]. Действенными мерами борьбы с утяжинами являются также повышение в алюминиевых расплавах содержания водорода [22] и кристаллизация отливки в вакуумной камере [43].

3. Газовые дефекты по вине металла

3.1. Происхождение газовых дефектов

Как уже отмечалось, если полость внутри затвердевающей отливки образовалась при положительном давлении расплава, такой дефект имеет газовое происхождение [8]. Для образования такой полости требуется пересыщение расплава водородом и наличие зародышей порообразования в виде неметаллических включений, особенно несмачиваемых расплавом. В этом случае давление газа в пузырьке должно отвечать неравенству [2, 3, 11, 52]:

$$P > Pa + Pm + \frac{2\sigma}{r}; r > \frac{2\sigma}{P - Pa - Pm};$$

где Pa , Pm и $\frac{2\sigma}{r}$ – давления соответственно атмосферное, металлостатическое и капиллярное; r – радиус пузырька; σ – поверхностное натяжение расплава.

Давление водорода в пузырьке равно давлению водорода, растворенного в расплаве, и может быть определено по закону Сиверта

$$S = S_0 \sqrt{P}; P = \left[\frac{S}{S_0} \right]^2;$$

где S – действительное содержание водорода в расплаве, S_0 – растворимость водорода при парциальном давлении, равном атмосферному.

Таким образом, чем больше содержание водорода в расплаве, тем более мелкие примесные включения будут задействованы в качестве зародышей пузырьков и, соответственно, тем больше будет этих пузырьков.

Отрыв пузырька от несмачиваемого включения маловероятен, возможно лишь их совместное всплывание [3]. Поэтому при повышенных содержаниях водорода в верхней части отливки обычно фиксируется скопление в основном мелких пузырьков, образовавшихся во время снятия перегрева и на начальной стадии кристаллизации [13, 22]. После образования сплошного кристаллического каркаса всплывание прекращается, но водород продолжает выделяться из расплава в междендритных пространствах и образует рассредоточенную междендритную пористость.

Исследованиями формирования непропитываемой технологической пробы из сплавов АК7 и АК12 в чугунной форме установлено [19], что при уменьшении длительности газонасыщения расплава АК7 с 3 мин до 5–15 с при температурах 720–740 °С и при газонасыщении при пониженных температурах (620–640 °С) зона всплывших пузырьков незаметна. Выдержка газонасыщенного расплава свыше 35 мин также уменьшает степень развития этой зоны, что особенно заметно на сплаве АК7. Охлаждение газонасыщенных расплавов перед заливкой в промежуточном ковше и тигле от 720–740 до 640 (расплав АК7) и до 600–615 °С (расплав АК12) также устраняет зону всплывших пузырьков.

Газонасыщение расплава увеличивает число пор в отливках, полученных в холод-

ной форме, и увеличивает размеры пор до 2,5 мм и уменьшает до этих же размеров поры в отливках, полученных в подогретых формах, при уменьшении их видимого количества. Макрошлифы отливок из газонасыщенного сплава АК12 имеют сходный характер независимо от исходной температуры формы. Повышение температуры формы сопровождается увеличением площади зоны пористости и ростом размера пор, что фиксируется визуально, но не соответствует реальному общему объему пористости, который по данным гидростатического взвешивания уменьшается. Можно сделать вывод об уменьшении той части пористости, которая визуально неразличима.

Уменьшение скорости заливки улучшило питание, но не изменило характера газовых дефектов – зона всплывшей пористости осталась.

При сравнительно низких газосодержаниях расплава размеры и распределение газовых пор зависят от состава сплава, газосодержания, модифицирования, вида литья. При газосодержании чистого алюминия более $0,6 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ в слитках образуется большое количество мелких пор размерами 1–150 мкм. Существенного различия в распределении пористости в центральной и периферической частях слитков не наблюдается [53]. В образцах из заэвтектического силумина образуются округлые, несколько вытянутые поры независимо от содержания водорода. Газосодержание расплава влияет лишь на степень развития пористости. В сплавах, кристаллизующихся в относительно широком температурном интервале (с содержанием 1,5, 3, 5, 7 и 8 % Si) при содержании водорода в жидком металле, большем $0,2 \text{ см}^3/100 \text{ г}$, образуется характерная для этих сплавов угловатая, разветвленная пористость. При малом содержании водорода (меньше $0,2 \text{ см}^3/100 \text{ г}$) в центре проб наряду с указанной пористостью появляется концентрированная усадочная рыхлота. В заэвтектическом сплаве с 20 % Si образуются округлые, неоднородные по размеру поры. Распределение их по сечению отливки неравномерное [54].

3.2. Влияние газовых дефектов на свойства отливки

По этому вопросу в работе [22] собран большой объем отечественной и зарубежной литературы (порядка 150 источников), анализ которой показал неоднозначное влияние водорода на свойства отливок из алюминиевых сплавов. В разделе негативного влияния показано, что, создавая газовую пористость, водород во многих случаях существенно понижает прочность и пластичность литого металла, исключая отливки из числа годных. В количественном плане при реально получаемых значениях газовой пористости величина падения прочности и пластичности может достигать соответственно (в %): AlSi7 – 35 и 75, AlSi9 и AlSi12 – 25 и 50, Al–Si–Cu – 30 и 50, Al–Cu – 24 и 33, Al–Mg – 30 и 40, Al–Zn – 25 и 100. Более подробные данные по сплавам Al–Cu, Al–Mg и Al–Zn приведены в табл. 1, а по системе Al–Si–Cu в табл. 2.

К числу других свойств, чувствительных к негативному воздействию газовой пористости, следует отнести: текучесть, выносливость, усталость, хрупкость, коррозию, гидроплотность, ударную вязкость, ликвацию.

В разделе положительного влияния приведено заявление М. Б. Альтмана о том, что увеличение пористости сплава АЛ4 с 1-го до 3-го балла незначительно повлияло на уменьшение прочности и пластичности [55], а в работе [56] было установлено, что снижение плотности сплава Д1 на 2,5 % вследствие газонасыщения при контакте с водой во время заливки не сказалось на пластичности.

Отсутствие или незначительность отрицательного влияния водородной пористости на механические свойства алюминиевых сплавов можно расценивать как положительный фактор, поскольку в таких случаях представляется возможным использовать водородную пористость для решения других вопросов: устранение утяжин, рассредоточение внутренних концентрированных усадочных дефектов, повышение герметичности, сокращение расхода жидкого металла на прибыли.

В работе [57] при небольшом размере пор (до 50 мкм) наблюдали упрочнение материала по сравнению с монолитом, имеющим тот же химический состав. Немецкие исследователи посвятили свою работу [58] непосредственно влиянию по-

Таблица 1

Влияние газовой пористости на механические свойства сплавов Al–Cu, Al–Mg и Al–Zn

Сплав	Изменение пористости, баллы, %		Условия изменения пористости	Снижение свойств, %	
	от	до		σ_B	δ
AlCu2Si	–	0,57	изменение содержания водорода	14	33
AlCu2Si	–	0,2	слитки	16	19
AlCu2Si	–	–	изменение содержания водорода от 0,14 до 0,3 см ³ /100 г	14	33
AlCu4Si	0,06	0,8	наводороживание	–	70
AlCu4Si	–	1,5	слитки	24	22
AlCu4,5	0,1	1	песчаная форма	20	–
AlCu5Mn	III	IV	рафинирование вакуумом	5	–
AlMg6	–	0,07	слитки	11	21
AlMg6	I	V	наводороживание, песчаная форма	20	35
AlMg7	0,2	1,2	сохранение структуры	25	–
AlMg9,4	0,2	1,2	сохранение структуры	30	–
AlMgZn	I	V	изменение толщины стенки отливки	5–12	39–44
AlMgZn	–	–	повышение содержания водорода от 0,21 до 0,44 см ³ /100 г	7	28
AlZn6Mg-2Cu2	–	–	повышение содержания водорода, слитки	16–25	100
AlZn7Mg2Cu	–	0,7	слитки	8	17

Таблица 2

Влияние газовой пористости на механические свойства сплавов Al–Si–Cu

Сплав	Изменение пористости, баллы, %		Условия изменения пористости	Снижение свойств, %	
	от	до		σ_B	δ
AlSi4Cu4Zn2	I–II	III–IV	песчаная форма	13	50
AlSi5Cu2	I	II	литье в кокиль	2	44
AlSi5Cu2	–	0,8	наводороживание, средняя скорость кристаллизации	25	–
AlSi8Cu3Zn	–	1,5–3	–	24–30	–
AlSi9Cu2	–	1,5–3	–	24–30	–
AlSi9,5Cu	–	–	наводороживание, кокиль	17	40
AlSi12CuMg	–	0,5	понижение плотности	9	44

риности на механические свойства отливок из алюминиевых сплавов толщиной 20 мм (табл. 3). Как видно, в целом газовая пористость приводит к некоторому снижению прочности, зато пластичность в большинстве случаев увеличивается. В

работе югославских исследователей [59] из модифицированного силумина АК9 литьем в песчаные формы (ЛПФ) и по газифицированным моделям (ЛГМ) получали плиту 200x50x20 мм (табл. 4). В этом случае вместе с пористостью увеличивались σ_B и δ .

В ФТИМС НАН Украины исследовали влияние водородной пористости на механические свойства отливок из сплава АК12, получаемых литьем в кокиль в условиях гарантированного питания [60]. Учтены толщина стенки отливки и положение при заливке. Несмотря на повышение газовой пористости в 10–20 раз (от 0,1–0,2 до 1,5–2 %), прочность и пластичность вертикальных стенок практически не ухудшились, а в горизонтальных стенках даже улучшаются, в том числе пластичность повышается в 1,5 раза. Причем с увеличением выдержки после наводороживания вместе со снижением пористости уменьшается и относительное удлинение.

Среди других свойств, на которые водородная пористость оказывает положительное влияние, следует назвать трещиностойкость и горячеломкость. Многократно доказано, что повышение газонасыщенности сплавов увеличивает предусадочное расширение и, соответственно, уменьшает усадку в интервале кристаллизации, что резко сокращает или даже устраняет образование горячих трещин [61, 62]. Благодаря этому и обособленному расположению газовых пор улучшается герметичность [62–64]. Лучшие результаты получаются при литье в горячий кокиль (до 400 °С) силуминов, близких по составу к эвтектике [64].

Чем больше содержание газа в металле, тем менее вероятно образование утяжин [28, 45] (табл. 5). При этом уменьшается зазор между отливкой и формой, что ускоряет процесс затвердевания [22].

Компенсируя усадку и устраняя недопустимые усадочные дефекты, водородная пористость берет на себя функции прибыли и тем самым сокращает непроизводительные расходы жидкого металла на литниково-питающую систему [43, 65].

Все описанные положительные проявления газовой пористости – заслуга рассредоточенных междендритных пор. Что же касается всплывающей пористости, то она в этом не участвует и, более того, из-за ослабления верхней части отливки ее следует считать вредной [22]. Задача устранения вредной всплывающей пористости при одновременном увеличении полезной междендритной может быть решена путем литья газонасыщенных сплавов под переменным давлением

Таблица 3

Влияние пористости на механические свойства отливок из алюминиевых сплавов толщиной 20 мм

Сплав	Пористость, %	σ_B , МПа	δ , %
AlSi7Mg0,6Na	0	288	1,4
	3,7	280	1,3
	8,6	270	1,6
AlCu4TiNa	0	306	3,1
	1,4	287	3,3
AlSi11MgSr	0	131	2,4
	3,0	130	3,2
AlSi11Mg	0	141	3,1
	3,4	144	3,0
AlSi11Sr	0	150	14,1
	3,4	137	12,5

Таблица 4

Влияние ЛГМ на свойства силуминовых отливок

Метод литья	Пористость, %	σ_B , МПа	δ , %
ЛПФ	2,35	110	1,5
ЛГМ	4,0	122	3,3
ЛГМ	4,8	127	3,7
ЛГМ	5,7	125	4,2

Таблица 5

Влияние водорода на утяжку силуминовых отливок в зависимости от содержания кремния

Содержание водорода, см ³ /100 г	Объем утяжин в см ³ при содержании Si, в %			
	0	6	11,5	15
0,2–0,3	0,93	2,54	0,93	0,83
0,8–1,1	0,90	0,86	0,52	0,45

[66], суть которого в том, что заливку формы и начальную стадию кристаллизации отливки осуществляют в автоклаве под избыточным газовым давлением, а после образования в отливке сплошного кристаллического каркаса величину давления понижают, например, до атмосферного.

3.3. Устранение газовых дефектов

Для алюминиевых сплавов из-за низкого коэффициента перераспределения водорода между твердой и жидкой фазами и реального содержания водорода в рабочих расплавах даже после их рафинирования известными методами газовая пористость практически неизбежна [67]. Это подтверждается результатами сравнения эффективности различных методов рафинирования по плотности образцов из сплавов АЛ4 и АЛ9 [52]: хлористым марганцем, универсальным флюсом, гексахлорэтаном, фильтрацией через активный флюс, титановым газопоглотителем, аргоном, ультразвуком с последующим модифицированием, вакуумированием, модифицированием с последующим ультразвуком, комбинированным рафинированием (фильтрация и вакуумирование); кристаллизацией в автоклаве. Исследованные методы рафинирования перечислены в порядке повышения эффективности. В пересчете на пористость разница между максимумом и минимумом составляет 1,8 %. Это значит, что выбирая один из перечисленных методов, мы заведомо идем на определенный процент пористости. При этом нужно иметь в виду, что для сплава АК7 (АЛ9) пористость 0,5 % может снизить прочность от 224 (при 0,05 % пористости) до 145 МПа [67], а для сплава АК9 (АЛ4) с ростом пористости до 1,8 % возможно снижение прочности от 240 до 170 МПа [22]. Аналогичные данные приведены в работе [2]. Наиболее эффективным методом устранения газовой пористости оказалась кристаллизация в автоклаве – метод, в котором давление (обычно 5–6 атм) передается внутрь затвердевающей отливки рассредоточенно путем деформации ее поверхности.

Уменьшить содержание водорода в расплаве и газовую пористость в отливке можно также путем ускорения охлаждения [6], термовременной обработкой и присадкой твердого сплава [5]. Пути устранения вредной всплывающей пористости рассмотрены параллельно с ее происхождением в подразделе 2.1.

4. Ресурсосбережение

Основная задача теории литейных процессов состоит в разработке способов получения отливок и слитков, отвечающих заданным требованиям по качеству, при минимальных затратах материалов, энергии и труда [68, 69]. Многие авторы [28, 37, 70, 71] высказываются о нецелесообразности полного устранения усадочных дефектов. В ряде случаев, особенно при литье сплавов с большим температурным интервалом затвердевания, ставят прибыли, питающие отливку только до возникновения в ней 20–30 % твердой фазы. Дальнейшее питание считают необязательным, если в отливке образуется рассредоточенная усадочная и газовая пористость без заметных сосредоточенных раковин [1, 72]. Стремление обеспечить максимальное измельчение и равномерное распределение пор по объему отливки отражено как в зарубежных [49, 73], так и в отечественных [74] работах.

С учетом особой сложности борьбы с усадочными явлениями для некоторых отливок (например, колеса из сплава AlSi12 [75]) разработаны эталоны допустимой пористости. В работе [76] критерием годности отливок из алюминиевого сплава с 4,5 % Si принято значение максимальной пористости 3 %. Эти примеры в совокупности с приведенным в подразделе 2.2. более длинным перечнем положительных проявлений водородной пористости можно дополнить разработанными в ФТИМС НАН Украины и внедренными в производство «водородными» технологиями [46]:

- на литейном заводе КАМАЗа при литье под низким давлением из сплава АЛ4 отливок картера маховика брак по негерметичности из-за усадочных раковин был уменьшен путем газонасыщения расплава в 1,7 раза;

- на Тогузагском механическом заводе (Казахстан) обработка жидкого сплава АЛ4 влажным асбестом также позволила снизить брак отливок коллекторов по негерметичности на 50 %;

Затвердевание сплавов

– на литейном участке Киевского филиала ВНИИМонтажспецстроя внедрена технология получения под низким давлением нагревательных плит для сварочного инструмента. Использование газонасыщенных силуминов позволило обеспечить требуемую размерную точность и практически устранить механическую обработку.

Интересной и эффективной оказалась технология устранения утяжин путем внутриформенного локального наводороживания отливки. Перед каждой заливкой участок окрашенной формы в месте образования утяжины опрыскивали водой из пульверизатора. И хотя температура формы была значительно выше 100 °С, пар удерживался слоем краски, и утяжины исчезали [77].

Для получения плотных отливок из необработанных или рафинированных сплавов предложены другие ресурсосберегающие решения [42].

Наиболее простой путь – замена прибылей более легкоплавким инфильтратом. Экспериментальным путем доказана возможность приближения коэффициента использования жидкого металла к 100 %, то есть практически полного устранения непроизводительных расходов жидкого металла на литниково-питающую систему, составляющих в среднем 40–50 % приготовленного расплава.

Второй путь – использование для питания отливки легкоплавкой междендритной жидкости прибыли путем прессования ее периферийных твердожидких участков с выдавливанием легкоплавкой фазы в центральную часть, то есть прибыль сама себе готовит инфильтрат. Масса прибыли сокращается в 2–3 раза.

Устранение внутренних усадочных раковин и пор возможно путем впрессовывания в металлоемкий узел куполообразного напуска, равного по объему устраняемым дефектам, без внедрения в тело отливки прессующего поршня, набранного из коаксиальных элементов с возможностью их относительного перемещения на 0,5–2 мм.

Определенную номенклатуру фасонных отливок с несколькими металлоемкими узлами можно получать без прибылей, без прессующих устройств, без водородной пористости и с высокой интенсивностью затвердевания независимо от размера отливки. Это РАСЛИТ-процесс, отличительной особенностью которого является постоянный контакт ванны расплава с нижней частью формы в зоне литниково-питающих каналов. Внедрение технологии в промышленность сдерживается дорогим оборудованием. Предлагается упрощенный РАСЛИТ-процесс с поворотом формы [78].

Предлагается новая технология, совмещающая гравитационное заполнение формы расплавом с автономным питанием затвердевающей отливки то ли под низким газовым давлением, то ли под металлостатическим напором более тяжелого расплава, например, свинца. Малогабаритное питающее устройство расположено ниже формы, поэтому не влияет на размеры отливки [79, 80].

Выводы

- Образующиеся внутри отливки полости одни авторы считают газоусадочными, другие разделяют эти полости отдельно на газовые и усадочные в зависимости от напряженного состояния расплава во время их зарождения и развития. В то же время оказывается, что отдельно газовые и отдельно усадочные дефекты не только зарождаются и развиваются в разных условиях, но также по-разному влияют на свойства отливок и требуют разных мероприятий по устранению. Например, для нетехнологичных отливок (отсутствие направленности затвердевания) рафинирование расплава усугубит образующиеся дефекты (недопустимые концентрированные усадочные раковины), а наводороживание улучшит (допустимые рассредоточенные газовые микропоры). Если же подходить с позиции газоусадочных дефектов, принятие нужного решения окажется проблематичным.

- И усадочную осевую пористость, и рассредоточенную газовую считают неизбежными элементами макроструктуры. Однако объемы этих дефектов, размеры и конфигурация пор зависят от типа сплава и условий литья, поэтому при работе с новыми сплавами и отливками эти вопросы должны быть обязательно исследованы, в первую очередь влияние условий питания и интенсивности затвердевания на формирование и свойства отливок.

Затвердевание сплавов

При литье рафинированных сплавов устранить внутренние усадочные дефекты возможно либо организацией направленности затвердевания в сторону питающего узла, либо (для тонкостенных отливок) за счет деформации поверхности (утяжка).

- Следует отличать направленное затвердевание от направленного температурного градиента в сторону прибыли. В последнем случае нет гарантий получения здоровой отливки, так как именно в подприбыльной зоне с продольным перепадом температур перемещение питающего расплава через эту зону сопровождается выделением соответствующей температуре тугоплавкой составляющей, что приводит к частичной или полной закупорке питающих каналов.

- Спорность вопроса об образовании рассеянной усадочной пористости в результате усадки при затвердевании микроскопических объемов жидкого металла, обособленного неравномерно растущими дендритами, требует отдельного исследования в конкретном случае.

- Механизмы образования концентрированной усадочной раковины и усадочной рыхлоты отличаются соотношением образующегося в междендритных ячейках на поверхности разрыва твердожидкой массы капиллярного давления и прочности кристаллического каркаса. Если величина капиллярного давления окажется больше, образуется раковина, если меньше – рыхлота. В первом случае смещается поверхность разрыва, во втором кристаллический каркас стоит на месте, а сквозь него под действием усадки перемещается жидкая фаза.

- Усадочные пустоты, образующиеся при отрицательном давлении и имеющие тенденцию сосредоточения и сообщения, всегда вредны: резко снижаются механические свойства, герметичность и др. При малой усадке исключение может составить разновидность усадочной пористости, возникающей при отрицательном давлении в результате увеличения объема газа, занимающего несплошности твердых неметаллических включений: образуются рассредоточенные обособленные поры.

- Организация направленности затвердевания сводится в основном к ускорению затвердевания всеми существующими способами на одних участках отливки и замедлению на других. Интересным в этом плане представляется разработанный в ФТИМС НАН Украины способ управления интенсивности затвердевания путем регулирования перепада давлений в зоне контакта отливки с формой.

- Внешний усадочный дефект отливок – утяжины. Обычно этот дефект сопутствует внутренним усадочным дефектам и делит с ними дефицит питания. Для одних сплавов (Al+6%Si) некомпенсированную прибыль усадку берет на себя обычно утяжка, тогда как в заэвтектических сплавах – внутренние раковины и рыхлота. Поэтому первые сплавы целесообразно использовать для получения плотных отливок, организация питания которых вызывает серьезные затруднения, а требования к размерной точности допускают рассредоточенную деформацию поверхности. Использование вторых сплавов экономически выгодно при производстве сложных, с точки зрения питания, отливок, для которых основным требованием является обеспечение высокой размерной точности. Определить здесь место нового сплава без специальных исследований затруднительно. Отмечается экстремальный характер влияния скорости охлаждения отливки на образование утяжин с максимумом при средней интенсивности охлаждения. Здесь играют роль время пребывания в питающем канале жидкой фазы и расход питающего расплава.

Действенными мерами борьбы с утяжинами являются направленное затвердевание, повышение в расплаве содержания водорода и кристаллизация отливки в вакуумной камере.

- Газовые дефекты внутри отливки образуются при положительном давлении расплава и имеют тенденцию рассредоточения и обособления. Чем больше степень пересыщения расплава водородом, тем более мелкие примесные включения будут задействованы в качестве зародышей, и, соответственно, тем больше будет этих пузырьков. Если пузырьки образовались в жидком металле или в жидкоподвижной суспензии, они всплывают вверх и скапливаются в верхней части отливки, ослабляя

эту часть. Поэтому всплывающая пористость считается вредной. Если пузырьки образовались в твердожидкой массе сплава, они остаются на месте и создают полезную междендритную пористость, которая чаще несколько снижает прочность литого металла, но литое изделие может соответствовать предъявляемым требованиям, зато наличие такой пористости позволяет устранить недопустимые концентрированные усадочные раковины и утяжины, повысить герметичность непропитываемых узлов и трещиностойчивость, а в ряде случаев повышается и пластичность. Степень положительного влияния зависит от состава сплава и условий литья, поэтому требуется экспериментальная проверка.

- Задача устранения вредной всплывающей газовой пористости при одновременном увеличении полезной междендритной решается путем выдержки или быстрого охлаждения наводороженного расплава при экспериментально установленных оптимальных режимах. Можно также использовать литье газонасыщенных сплавов под переменным давлением: заливку формы и начальную стадию кристаллизации отливки осуществляют в автоклаве под избыточным давлением, а после образования в отливке сплошного кристаллического каркаса величину давления понижают, например, до атмосферного.

- Для снижения газовой пористости используют существующие методы рафинирования, термовременную обработку расплава, присадку в расплав твердого сплава, повышение интенсивности затвердевания сплава, кристаллизацию в автоклаве.

- Основная задача литейщика состоит в выборе или разработке способов получения отливок, отвечающих заданным требованиям по качеству, при минимальных затратах материалов, энергии и труда. Для этого нужно использовать положительные проявления водородной пористости, замену прибылей более легкоплавким инфильтратом или использование выдавленной из прибыли междендритной жидкости, впрессовывание в непропитываемый узел куполообразного напуска без внедрения прессующего инструмента в тело отливки. Определенную номенклатуру плотных фасонных отливок с несколькими металлоемкими узлами, в том числе крупногабаритных, можно получать с выходом годного, близким к 100 %, с высокой интенсивностью затвердевания, отсутствием загрязнения отливки окисными и шлаковыми включениями РАСЛИТ-процессом. Особенностью этой технологии является постоянный контакт ванны расплава с нижней частью формы в зоне литниково-питающих каналов. Благодаря однонаправленной кристаллизации сверху вниз в таких отливках исключается образование осевой усадочной пористости. Внедрение технологии в промышленность сдерживается дорогим оборудованием. Прорабатываются более дешевые варианты, в частности, упрощенный РАСЛИТ-процесс с поворотом формы.

В числе новых проектов заслуживают внимания технологии, совмещающие гравитационное заполнение формы расплавом сверху с автономным питанием затвердевающей отливки снизу.



Список литературы

1. Рыжиков А. А. Технологические основы литейного производства. – М.: Машгиз, 1962. – 528 с.
2. Гуляев Б. Б. Теория литейных процессов. – Л.: Машиностроение, 1976. – 216 с.
3. Куманин И. Б. Вопросы теории литейных процессов. – М.: Машиностроение, 1976. – 216 с.
4. Строганов Г. Б. Высокопрочные литейные алюминиевые сплавы. – М.: Металлургия, 1985. – 216 с.
5. Ершов Г. С., Бычков Ю. Б. Высокопрочные алюминиевые сплавы на основе вторичного сырья. – М.: Металлургия, 1979. – 192 с.
6. Добаткин В. И., Габидуллин Р. М., Колачев Б. А., Макаров Г. С. Газы и окислы в алюминиевых деформируемых сплавах. – М.: Металлургия, 1976. – 264 с.
7. Чалмерс Б. Теория затвердевания. – М.: Металлургия, 1968. – 288 с.

Затвердевание сплавов

8. Котлярский Ф. М. Теоретические предпосылки формирования усадочных и газовых дефектов в непропитываемых узлах отливки // Литейное производство. – 1983. – № 7. – С. 22–24.
9. Бочвар А. А. Металловедение. – М.: Metallurgizdat, 1956. – 401 с.
10. Баландин Г. Ф. Основы теории формирования отливки. Ч. II. – М.: Машиностроение, 1979. – 335 с.
11. Рыжиков А. А. Теоретические основы литейного производства. – М.; Свердловск: Машгиз, 1961. – 447 с.
12. Гуляев Б. Б. Затвердевание и неоднородность стали. – М.: Metallurgizdat, 1950. – 228 с.
13. Котлярский Ф. М. Формирование отливок из алюминиевых сплавов. – К.: Наукова думка, 1990. – 216 с.
14. Куманин И. Б. Об усадочной пористости в отливках // Литейное производство. – 1957. – № 4. – С. 18–23.
15. Шаров М. В., Бибиков Е. Л. Пористость в отливках из сплавов системы магний–алюминий–цинк // Усадочные процессы в металлах. – М.: АН СССР, 1960. – С. 121–132.
16. Сокольская Л. Н. Газы в легких металлах. – М.: Metallurgizdat, 1959. – 115 с.
17. Берг П. П., Готов Е. Б. Герметичность отливок из сплава АЛ9 // Литейное производство. – 1967. – № 3. – С. 26–27.
18. Котлярский Ф. М. Формирование силуминовых отливок на стадии фильтрационного питания // Процессы литья. – 2016. – № 1. – С. 13–27.
19. Отчет по теме НИР 1.6.5.476. Разработка научных основ повышения качества и эффективности производства отливок из алюминиевых сплавов путем водородной обработки расплава и литья под давлением. – К.: ФТИМС НАН Украины, 2004. – 378 с.
20. Белик В. И. Теоретические предпосылки использования упругих свойств расплава при получении отливок // Процессы литья. – 1994. – № 3. – С. 53–62.
21. Белик В. И. Условия формирования однородной пористости в отливках // Процессы литья. – 1995. – № 3. – С. 58–66.
22. Котлярский Ф. М. Водород в алюминиевых сплавах и отливках. – К.: Освіта України, 2011. – 208 с.
23. Пржибыл Й. Затвердевание и питание отливок. – М.: Машгиз, 1957. – 287 с.
24. Шекалов А. А., Штрейс Я. И., Блинов Б. В. Плавка в малых индукционных печах. – М., Л.: Машиностроение, 1965. – 75 с.
25. Горшков И. Е. Литье слитков цветных металлов и сплавов. – М.: Metallurgizdat, 1952. – 416 с.
26. Нехендзи Ю. А. Стальное литье. – М.: Metallurgizdat, 1948. – 767 с.
27. Яндер Э. Кокильная отливка деталей из легких сплавов // Лейпцигская конференция литейщиков, 1956. – М.: Машгиз, 1957. – С. 100–115.
28. Пржибыл Й. Теория литейных процессов. – М.: Мир, 1967. – 328 с.
29. Чурсин В. М., Пименов А. М. Влияние литейных свойств на герметичность отливок из медных сплавов // Литейные свойства металлов и сплавов. – М.: Наука, 1967. – С. 183–185.
30. Гуляев Б. Б. Литейные процессы. – М., Л.: Машгиз, 1960. – 416 с.
31. Арбузов Б. А., Аристова Н. А., Глазунов С. Г. Цветное литье (легкие сплавы). – М.: Машиностроение, 1966. – 392 с.
32. Книпп Э. Пороки отливок. – М.: Гостехиздат, 1958. – 276 с.
33. Лебедев В. М., Мельников А. В., Постников Н. С. Фасонное литье алюминиевых сплавов. – М.: Metallurgija, 1972. – 152 с.
34. Храмов В. Д., Машаков Е. В. Литье крупногабаритных тонкостенных деталей способом направленно-последовательной кристаллизации // Труды московского авиационно-технического института. – 1961. – № 49. – С. 5–23.
35. Хворинин Н. И. Затвердевание отливок. – М.: Иностран. лит-ра, 1955. – 142 с.
36. Анисович Г. А. Затвердевание отливок. – Минск: Наука и техника, 1979. – 232 с.
37. Вейник А. И. Теория затвердевания отливки. – М.: Машгиз, 1960. – 435 с.
38. Панкратов В. А., Кац Э. Л., Айзикович В. Я. Регулировка температурного поля формы при литье плотных тонкостенных деталей // Перспективы развития производства литья по выплавляемым моделям. – М.: МДНТП, 1975. – С. 134–141.
39. Денисов В. А., Бельцов Н. Ф., Костенецкий С. В., Гуменный Н. В., Ложкин Г. С. Повышение плотности стальных отливок // Свойства сплавов в отливках. – М.: Наука, 1975. – С. 181–185.
40. А.с. 621461 СССР, В22D 27/04. Способ охлаждения отливки в литейной форме / А. К. Куцафин, П. Е. Лученинов, Н. Г. Ермолин и др. – Оpubл. 01.04.77, Бюл. № 32.
41. А.с. 910349 СССР, МКЦ4 В22D 27/04. Способ получения отливок / Ф. М. Котлярский, Г. П. Борисов, А. И. Семенченко. – Оpubл. 7.03.82, Бюл. № 9.
42. Котлярский Ф. М., Борисов Г. П. Малоотходное литье алюминиевых сплавов. – Киев.: ФТИМС НАН Украины, 2007. – 160 с.

Затвердевание сплавов

43. Котлярский Ф. М. О факторах формирования бесприбыльных отливок из алюминиевых сплавов // Процессы литья. – 2012. – № 4. – С. 27–44.
44. Цветное литье. Справочник / Н. М. Галдин, Д. Ф. Чернега, Д. Ф. Иванчук и др.
45. Котлярский Ф. М., Борисов Г. П., Белик В. И. Образование утяжин в отливках из алюминиевых сплавов // Литейное производство, 1986. – № 4. – С. 9–11.
46. Котлярский Ф. М. Процессы образования и методы снижения физической и химической неоднородности отливок из алюминий-кремниевых сплавов.: дис. докт. техн. наук / Ф. М. Котлярский. – К.: ИПЛ АН УССР, 1991. – 440 с.
47. Шилов И. Ф., Дворецкий В. В. Исследование процесса образования усадочных дефектов в литых сопряжениях различной конфигурации // Труды Всесоюзного Проектного института алюминевой, магниевой и электродной промышленности. – 1976. – № 96. – С. 81–85.
48. Бочвар А. А. Полезный эффект кристаллизации сплавов под давлением в зависимости от состава сплава // Изд. АН СССР. Отделение техн. наук. – 1940. – № 7. – С. 27–30.
49. Askeland D. R., Holt M. L. Gratanschnitt bei Aluminiumgusstecken // Giesserei Prax. – 1976. – № 6. – pp. 80–88.
50. Флемингс М. Процессы затвердевания. – М.: Мир, 1977. – 423 с.
51. Sylvain J., Drouzy M. Etude du masselottage des alliages d'aluminium conles en sable // Fonderie. – 1975. – vol. 30. – № 341. – pp. 17–28.
52. Альтман М. Б., Готов Е. Б., Засыпкин В. А., Макаров Г. С. Вакуумирование алюминиевых сплавов. – М.: Metallurgiya, 1977. – 240 с.
53. Гудченко А. П., Кузьмичев Л. В. Образование пористости в слитках алюминия // Исследование процессов литья алюминиевых, магниевых и титановых сплавов. Труды МАТИ. – 1969. – № 70. – С. 117–132.
54. Гудченко А. П. Образование газовой пористости в отливках из алюминий-кремниевых сплавов // Вопросы технологии литейного производства. Труды МАТИ. – 1961. – № 49. – С. 120–136.
55. Альтман М. Б. Неметаллические включения в алюминиевых сплавах. – М.: Metallurgiya, 1964. – 127 с.
56. Крупман Л. И., Онопченко В. М., Комаров А. А., Щербаков А. И. Литье сплавов алюминия охлаждением струи жидкой средой // Технология легких сплавов (ВИЛС). – 1973. – № 12. – С. 29–32.
57. Шаповалов В. И. Литые пористые сплавы: производство, структура, свойства и применение // Металл и литье Украины. – 1995. – № 2. – С. 2–10.
58. Sonsino C. M., Dietrich K. Einfluß der Porosität auf das Schwingfestigkeitsverhalten von Aluminium-Guwerkstoffen-Teil 1 // Giesser. Forsch. – 1991. – vol. 43. – № 3. – С. 119–130.
59. Ачимович З. С., Томович М. Н., Томович С. М., Джуричич М. Р. Качество отливок из силумина, полученных литьем по газифицируемым моделям // Литейное производство. – 1994. – № 12. – С. 18–19.
60. Котлярский Ф. М., Борисов Г. П., Белик В. И., Вернидуб А. Г. Влияние водородной обработки силуминовых расплавов на механические свойства отливок // Процессы литья. – 2004. – № 2. – С. 56–61.
61. Гиршович Н. Г., Лебедев К. П., Нехендзи Ю. А. Предусадочное расширение черных и цветных сплавов // Литейное производство. – 1963. – № 4. – С. 23–28.
62. Новиков И. И. Горячеломкость цветных металлов и сплавов. – М.: Наука, 1966. – 299 с.
63. Постников Н. С. Высокогерметичные алюминиевые сплавы. – М.: Metallurgiya, 1972. – 160 с.
64. Котлярский Ф. М. О возможности получения герметичных бесприбыльных отливок из алюминиевых сплавов // Литейное производство. – 1998. – № 7. – С. 17–19.
65. Пластинин В. А. Получение алюминиевого литья в кокиль с применением вакуума // Прогрессивная технология литейного производства. – Горький: ВВКИ, 1969. – С. 466–469.
66. А.с. 1822374 СССР, МКИЗ В22D 27/00 Способ литья газонасыщенных сплавов под переменным газовым давлением / Ф. М. Котлярский, В. И. Белик, Г. П. Борисов. – Опубл. 15.06.93, Бюл. № 22.
67. Котлярский Ф. М., Дука В. М. Комплексное влияние водородного рафинирования и скорости затвердевания на структуру и механические свойства сплава АК7 // Процессы литья. – 2016. – № 2. – С. 9–21.
68. Гуляев Б. Б. // Процессы литья. – 1990. – № 2. – С. 1–3.
69. Ефимов В. А., Эльдарханов А. С. Физические методы воздействия на процессы затвердевания сплавов. – М.: Metallurgiya, 1995. – 272 с.

70. Постнов Л. М., Гуляев Б. Б. Осевая усадочная пористость в стенках стальных отливок // Усадочные процессы в металлах. – М.: АН СССР, 1960. – С. 74–84.
71. Thurner H. Lunkerfreie Druckgusswerk-stucke erfordern Investitionen und erfahrene Facharbeiter // Maschinenmarkt. – 1982. – vol. 88. – № 18. – pp. 302–305.
72. Мерфи А. Дж. Плавка и литье цветных металлов и сплавов. – М.: Metallurgizdat, 1959. – 646 с.
73. Roland M. F. Beitrag zur Bestimmung und Bewertung des Lunker – Verhaltens von Gusslegierungen // Giessereitechnik. – 1979. – № 4. – pp. 101–104.
74. А.с. 994109 СССР, МКИ4 В22Д 27/04. Способ получения отливок / И. А. Новохатский, В. З. Кисунько, И. С. Виткалов, В. И. Ладьянов. – Оpubл. 29.01.79, Бюл. № 5.
75. Arbenz H. Jahresubersicht Leichtmetall-sand und Kokillenguss // Giesserei. – 1971. – vol. 66. – № 23. – pp. 848–859.
76. Baliah S., Srinivasan M., Srinivasan M., Seshardi. Dimensioning of plaster sleeved feeders for Al–4,5% Cu alloy // Casting. – 1974. – vol. 20, 21. – № 11, 12. – pp. 25–27, 29, 31–36.
77. А.с. 1556812 СССР, В22Д 27/20. Способ получения отливок из алюминиевых сплавов / В. И. Белик, Ф. М. Котлярский, Г. П. Борисов, В. С. Гавриш. – Оpubл. 15.04.90, Бюл. № 14.
78. Котлярский Ф. М. Упрощенный РАСЛИТ-процесс с поворотом формы // Процессы литья. – 2013. – № 3. – С. 34–36.
79. Котлярский Ф. М. Малоотходное кокильное литье // Процессы литья. – 2012. – № 1. – С. 21–24.
80. Котлярский Ф. М. Упрощение автономного питающего устройства // Процессы литья. – 2017. – № 2. – С. 39–44.



References

1. Ryzhikov, A. A. (1962) Tekhnologicheskie osnovy liteynogo proizvodstva [*Technological foundations of foundry*]. Moscow: Mashgiz, 528 p. [in Russian].
2. Gulyaev, B. B. (1976) Teoriya liteynykh protsessov [*Theory of foundry processes*]. L.: Mashinostroenie, 216 p. [in Russian].
3. Kumanin, I. B. (1976) Voprosy teorii liteynykh protsessov [*Questions of the theory of foundry processes*]. Moscow: Mashinostroenie, 216 p. [in Russian].
4. Stroganov, G. B. (1985) Vysokoprochnye liteynye alyuminievye splavy [*High-strength casting aluminum alloys*]. Moscow: Metallurgiya, 216 p. [in Russian].
5. Yershov, G. S., Bychkov, Yu. B. (1979) Vysokoprochnye alyuminievye splavy na osnove vtorichnogo syrya [*High-strength aluminum alloys based on recycled materials*]. Moscow: Metallurgiya, 192 p. [in Russian].
6. Dobatkin, V. I., Gabidullin, R. M., Kolachev, B. A., Makarov, G. S. (1976) Gazy i oksidy v alyuminievyykh deformiruemyykh splavakh [*Gases and oxides in aluminum deformable alloys*]. Moscow: Metallurgiya, 264 p. [in Russian].
7. Chalmers, B. (1968) Teoriya zatverdevaniya [*The theory of solidification*]. Moscow: Metallurgiya, 288 p. [in Russian].
8. Kotlyarskiy, F. M. (1983) Teoreticheskie predposylki formirovaniya usadochnyykh i gazovykh defektov v nepropityvaemykh uzlakh otlivki [*Theoretical prerequisites for the formation of shrinkage and gas defects in non-impregnated casting assemblies*]. Liteynoe proizvodstvo, no. 7, pp. 22–24. [in Russian].
9. Bochvar, A. A. (1956) Metallovedenie [*Metallurgy*]. Moscow: Metallurgizdat, 401 p. [in Russian].
10. Balandin, G. F. (1979) Osnovy teorii formirovaniya otlivki. Ch. II. [*Fundamentals of the theory of casting. Part II*]. Moscow: Mashinostroenie, 335 p. [in Russian].
11. Ryzhikov, A. A. (1961) Teoreticheskie osnovy liteynogo proizvodstva [*Theoretical foundations of foundry*]. Moscow; Sverdlovsk: Mashgiz, 447 p. [in Russian].
12. Gulyaev, B. B. (1950) Zatverdevanie i neodnorodnost stali [*Curing and heterogeneity of steel*]. Moscow: Metallurgizdat, 228 p. [in Russian].

13. Kotlyarskiy, F. M. (1990) Formirovanie otlivok iz alyuminiyevykh splavov [*Formation of castings from aluminum alloys*]. K.: Naukova dumka, 216 p. [in Russian].
14. Kumanin, I. B. (1957) Ob usadochnoy poristosti v otlivkakh [*Shrinkage porosity in castings*]. Liteynoe proizvodstvo, no. 4, pp. 18–23. [in Russian].
15. Sharov, M. V., Bibikov, Ye. L. (1960) Poristost v otlivkakh iz splavov sistemy magniy–alyuminiy–tsink [*Porosity in castings from alloys of the magnesium-aluminum-zinc system*]. Usadochnye protsessy v metallakh. Moscow: AN SSSR, pp. 121–132. [in Russian].
16. Sokolskaya, L. N. (1959) Gazy v legkikh metallakh [*Gases in light metals*]. Moscow: Metallurgizdat, 115 p. [in Russian].
17. Berg, P. P., Glotov, Ye. B. (1967) Germetichnost otlivok iz splava AL9 [*Sealing of castings from alloy AL9*]. Liteynoe proizvodstvo, no. 3, pp. 26–27. [in Russian].
18. Kotlyarskiy, F. M. (2016) Formirovanie siluminovykh otlivok na stadii filtratsionnogo pitaniya [*Formation of siluminamine castings at the stage of filtration nutrition*]. Protsessy litya, no. 1, pp. 13–27. [in Russian].
19. Otchet po teme NIR 1.6.5.476. Razrabotka nauchnykh osnov povysheniya kachestva i effektivnosti proizvodstva otlivok iz alyuminiyevykh splavov putem vodorodnoy obrabotki rasplava i litya pod davleniem [*Development of scientific foundations for improving the quality and efficiency of the production of castings from aluminum alloys by hydrogen treatment of melt and injection molding*]. K.: FTIMS NAN Ukrainy, 2004, 378 p. [in Russian].
20. Belik, V. I. (1994) Teoreticheskie predposylki ispolzovaniya uprugikh svoystv rasplava pri poluchenii otlivok [*Theoretical prerequisites for the use of elastic properties of a melt in the preparation of castings*]. Protsessy litya, no. 3, pp. 53–62. [in Russian].
21. Belik, V. I. (1995) Usloviya formirovaniya odnorodnoy poristosti v otlivkakh [*Conditions for the formation of uniform porosity in castings*]. Protsessy litya, no. 3, pp. 58–66. [in Russian].
22. Kotlyarskiy, F. M. (2011) Vodorod v alyuminiyevykh splavakh i otlivkakh [*Hydrogen in aluminum alloys and castings*]. K.: Osvita Ukrainy, 208 p. [in Russian].
23. Przhibyl, Y. (1957) Zatverdevanie i pitanie otlivok [*Curing and feeding of castings*]. Moscow: Mashgiz, 287 p. [in Russian].
24. Shekalov, A. A., Shtreys, Ya. I., Blinov, B. V. (1965) Plavka v malykh induktsionnykh pechakh [*Melting in small induction furnaces*]. Moscow, L.: Mashinostroenie, 75 p. [in Russian].
25. Gorshkov, I. Ye. (1952) Lite slitkov tsvetnykh metallov i splavov [*Casting of ingots of non-ferrous metals and alloys*]. Moscow: Metallurgizdat, 416 p. [in Russian].
26. Nekhendzi, Yu. A. (1948) Stalnoe lite [*Steel castings*]. Moscow: Metallurgizdat, 767 p. [in Russian].
27. Yander, E. (1957) Kokilnaya otlivka detaley iz legkikh splavov [*Chill casting of light alloy parts*]. Leyptsigskaya konferentsiya liteyshchikov, 1956. Moscow: Mashgiz, pp. 100–115. [in Russian].
28. Przhibyl, Y. (1967) Teoriya liteynykh protsessov [*Theory of Foundry Processes*]. M.: Mir, 328 p. [in Russian].
29. Chursin, V. M., Pimenov, A. M. (1967) Vliyanie liteynykh svoystv na germetichnost otlivok iz mednykh splavov [*Influence of casting properties on hermeticity of castings from copper alloys*]. Liteynye svoystva metallov i splavov. Moscow: Nauka, pp. 183–185. [in Russian].
30. Gulyaev, B. B. (1960) Liteynye protsessy [*Foundry processes*]. Moscow, L.: Mashgiz, 416 p. [in Russian].
31. Arbuzov, B. A., Aristova, N. A., Glazunov, S. G. (1966) Tsvetnoe lite (legkie splavy) [*Colored casting (light alloys)*]. Moscow: Mashinostroenie, 392 p. [in Russian].
32. Knipp, E. (1958) Poroki otlivok [*Casting flaws*]. M.: Gostekhizdat, 276 p. [in Russian].
33. Lebedev, V. M., Melnikov, A. V., Postnikov, N. S. (1972) Fasonnoe lite alyuminiyevykh splavov [*Shaped cast aluminum alloys*]. Moscow: Metallurgiya, 152 p. [in Russian].
34. Khramov, V. D., Mashakov, Ye. V. (1961) Lite krupnogabaritnykh tonkostennykh detaley sposobom napravlenno-posledovatelnoy kristallizatsii [*Casting of large-sized thin-walled parts by the method of directional sequential crystallization*]. Trudy moskovskogo aviatsionno-tekhnicheskogo instituta, no. 49, pp. 5–23. [in Russian].
35. Khvorinov, N. I. (1955) Zatverdevanie otlivok [*Hardening of castings*]. Moscow: Inostr. lit-ra, 142 p. [in Russian].
36. Anisovich, G. A. (1979) Zatverdevanie otlivok [*Hardening of castings*]. Minsk: Nauka i tekhnika, 232 p. [in Russian].
37. Veynik, A. I. Teoriya zatverdevaniya otlivki [*The theory of solidification of castings*]. Moscow: Mashgiz, 435 p. [in Russian].
38. Pankratov, V. A., Kats, E. L., Ayzikovich, V. Ya. (1975) Regulirovka temperaturnogo polya formy pri lite plotnykh tonkostennykh detaley [*Adjustment of the mold temperature field during casting*

- f dense thin-walled parts*]. Perspektivy razvitiya proizvodstva litya po vyplavlyаемым modelyam. Moscow: MDNTP, pp. 134–141. [in Russian].
39. Denisov, V. A., Beltsov, N. F., Kostenetskiy, S. V., Gumennyi, N. V., Lozhkin, G. S. (1975) Povyshenie plotnosti stalnykh otlivok [*Increasing the density of steel castings*]. Svoystva splavov v otlivkakh. Moscow: Nauka, pp. 181–185. [in Russian].
 40. A.s. 621461 SSSR, V22D 27/04. Sposob okhlazhdeniya otlivki v lityenoy forme [*Method of cooling the casting in a mold*]. Kutafin, A. K., Lucheninov, P. Ye., Yermolin, N. G. et al. Opubl. 01.04.77, Byul. no. 32. [in Russian].
 41. A.s. 910349 SSSR, MKTs4 V22D 27/04. Sposob polucheniya otlivok [*Method of obtaining castings*]. Kotlyarskiy, F. M., Borisov, G. P., Semenchenko, A. I. Opubl. 7.03.82, Byul. no. 9. [in Russian].
 42. Kotlyarskiy, F. M., Borisov, G. P. (2007) Malootkhodnoe lite alyuminievykh splavov [*Low-cast aluminum alloys casting*]. K.: FTIMS NAN Ukraina, 160 p. [in Russian].
 43. Kotlyarskiy, F. M. (2012) O faktorakh formirovaniya bespriblynykh otlivok iz alyuminievykh splavov [*About factors of formation of non-profit castings from aluminum alloys*]. Protsestry litya, no. 4, pp. 27–44. [in Russian].
 44. Galdin, N. M., Chernega, D. F., Ivanchuk, D. F. et al. Tsvetnoe lite. Spravochnik [*Colored casting. Directory*]. [in Russian].
 45. Kotlyarskiy, F. M., Borisov, G. P., Belik, V. I. (1986) Obrazovanie utyazhin v otlivkakh iz alyuminievykh plavov [*Formation of sinks in castings of aluminum alloys*]. Liteynoe proizvodstvo, no. 4, pp. 9–11. [in Russian].
 46. Kotlyarskiy, F. M. (1991) Protsestry obrazovaniya i metody snizheniya fizicheskoy i khimicheskoy neodnorodnosti otlivok iz alyuminievo-kremnievykh splavov [*Processes of formation and methods for reducing the physical and chemical heterogeneity of castings from aluminum-silicon alloys*]. Doctor's thesis. K.: IPL AN USSR, 440 p. [in Russian].
 47. Shilov, I. F., Dvoretzkiy, V. V. (1976) Issledovanie protsessov obrazovaniya usadochnykh defektov v litykh sopryazheniyakh razlichnoy konfiguratsii [*Investigation of the formation of shrinkage defects in cast matings of various configurations*]. Trudy Vsesoyuznogo Proektnogo instituta alyuminievoy, magnievoy i elektrodnoy promyshlennosti, no. 96, pp. 81–85. [in Russian].
 48. Bochvar, A. A. (1940) Poleznyy effekt kristallizatsii splavov pod davleniem v zavisimosti ot sostava splava [*Useful effect of crystallization of alloys under pressure, depending on the composition of the alloy*]. Izd. AN SSSR. Otdelenie tekhn. nauk, no. 7, pp. 27–30. [in Russian].
 49. Askeland, D. R., Holt, M. L. (1976) Gratanschnitt bei Aluminiumgusstecken. Giesserei Prax, no. 6, pp. 80–88. [in German].
 50. Flemings, M. (1977) Protsestry zatverdevaniya [*Curing processes*]. M.: Mir, 423 p. [in Russian].
 51. Sylvain, J., Drouzy, M. (1975) Etude du masselottage des alliages d aluminium conles en sable. Fonderie, vol. 30, no. 341, pp. 17–28. [in French].
 52. Altman, M. B., Glotov, Ye. B., Zasytkin, V. A., Makarov, G. S. (1977) Vakuumirovanie alyuminievykh splavov [*Vacuuming of aluminum alloys*]. Moscow: Metallurgiya, 240 p. [in Russian].
 53. Gudchenko, A. P., Kuzmichev, L. V. (1969) Obrazovanie poristosti v slitkakh alyuminiya [*Formation of porosity in ingots of aluminum*]. Issledovanie protsessov litya alyuminievykh, magnievykh i titanovykh splavov. Trudy MATI, no. 70, pp. 117–132. [in Russian].
 54. Gudchenko, A. P. (1961) Obrazovanie gazovoy poristosti v otlivkakh iz alyuminievo-kremnievykh splavov [*Formation of gas porosity in castings of aluminum-silicon alloys*]. Voprosy tekhnologii liteynogo proizvodstva. Trudy MATI, no. 49, pp. 120–136. [in Russian].
 55. Altman, M. B. (1964) Nemetallicheskie vklucheniya v alyuminievykh splavakh [*Non-metallic inclusions in aluminum alloys*]. Moscow: Metallurgiya, 127 p. [in Russian].
 56. Krupman, L. I., Onopchenko, V. M., Komarov, A. A., Shcherbakov, A. I. (1973) Lite splavov alyuminiya s okhlazhdeniem strui zhidkoy sredoy [*Casting of aluminum alloys with jet cooling by liquid medium*]. Tekhnologiya legkikh splavov (VILS), no. 12, pp. 29–32. [in Russian].
 57. Shapovalov, V. I. (1995) Litye poristyie splavy: proizvodstvo, struktura, svoystva i primenenie [*Cast porous alloys: production, structure, properties and applications*]. Metall i lite Ukrainy, no. 2, pp. 2–10. [in Russian].
 58. Sonsino, C. M., Dietrich, K. (1991) Einflu der Porositat auf das Schwingfestigkeitsverhalten von Aluminium-Gu werkstoffen-Teil 1. Giesser. Forsch, vol. 43, no. 3, pp. 119–130. [in German].
 59. Achimovich, Z. S., Tomovich, M. N., Tomovich, S. M., Dzhurichich, M. R. (1994) Kachestvo otlivok iz silumina, poluchennykh litem po gazifitsiruемым modelyam [*The quality of castings from silumin obtained by casting on gasified models*]. Liteynoe proizvodstvo, no. 12, pp. 18–19. [in Russian].
 60. Kotlyarskiy, F. M., Borisov, G. P., Belik, V. I., Vernidub, A. G. (2004) Vliyaniye vodorodnoy obrabotki siluminovykh rasplavov na mekhanicheskie svoystva otlivok [*Effect of hydrogen treatment of*

- silumin melt on the mechanical properties of castings*]. Protsessy litya, no. 2, pp. 56–61. [in Russian].
61. Girshovich, N. G., Lebedev, K. P., Nekhendzi, Yu. A. (1963) Predusadochnoe rasshirenie chernykh i tsvetnykh splavov [*Pre-spread expansion of ferrous and non-ferrous alloys*]. Liteynoe proizvodstvo, no. 4, pp. 23–28. [in Russian].
62. Novikov, I. I. (1966) Goryachelomkost tsvetnykh metallov i splavov [*Hot brittleness of non-ferrous metals and alloys*]. Moscow: Nauka, 299 p. [in Russian].
63. Postnikov, N. S. (1972) Vysokogermetichnye alyuminievye splavy [*High-temperature aluminum alloys*]. Moscow: Metallurgiya, 160 p. [in Russian].
64. Kotlyarskiy, F. M. (1998) O vozmozhnosti polucheniya germetichnykh bespriblynykh otlivok iz alyuminievykh splavov [*On the possibility of obtaining hermetically sealed non-profit castings from aluminum alloys*]. Liteynoe proizvodstvo, no. 7, pp. 17–19. [in Russian].
65. Plastinin, V. A. (1969) Poluchenie alyuminievogo litya v kokil s primeneniem vakuuma [*Preparation of aluminum casting in a mold using vacuum*]. Progressivnaya tekhnologiya liteynogo proizvodstva. Gorkiy: VVKI, pp. 466–469. [in Russian].
66. A.s. 1822374 SSSR, MKI3 B22D 27/00. Sposob litya gazonasyshchennykh splavov pod peremennym gazovym davleniem [*The method of casting gas-saturated alloys under variable gas pressure*]. Kotlyarskiy, F. M., Belik, V. I., Borisov, G. P. Opubl. 15.06.93, Byul. no. 22. [in Russian].
67. Kotlyarskiy, F. M., Duka, V. M. (2016) Kompleksnoe vliyaniye vodorodnogo rafinirovaniya i skorosti zatverdevaniya na strukturu i mekhanicheskiye svoystva splava AK7 [*The complex effect of hydrogen refining and the rate of solidification on the structure and mechanical properties of the AK7 alloy*]. Protsessy litya, no. 2, pp. 9–21. [in Russian].
68. Gulyaev, B. B. (1990) Protsessy litya, no. 2, pp. 1–3. [in Russian].
69. Yefimov, V. A., Eldarkhanov, A. S. (1995) Fizicheskiye metody vozdeystviya na protsessy zatverdevaniya splavov [*Physical methods of influence on the solidification of alloys*]. Moscow: Metallurgiya, 272 p. [in Russian].
70. Postnov, L. M., Gulyaev, B. B. (1960) Osewaya usadochnaya poristost v stenkakh stalnykh otlivok [*Axial shrinkage porosity in the walls of steel castings*]. Usadochnyye protsessy v metallakh. Moscow: AN SSSR, pp. 74–84. [in Russian].
71. Thurner, H. (1982) Lunckerfreie Druckgusswerk-stucke erfordern Investitionen und erfahrene Facharbeiter. Maschinenmarkt, vol. 88, no. 18, pp. 302–305. [in German].
72. Merfi, A. Dzh. (1959) Plavka i lite tsvetnykh metallov i splavov [*Melting and casting of non-ferrous metals and alloys*]. Moscow: Metallurgizdat, 646 p. [in Russian].
73. Roland, M. F. (1979) Beitrag zur Bestimmung und Bewertung des Luncker – Verhaltens von Gus-slegierungen. Giessereitechnik, no. 4, pp. 101–104. [in German].
74. A.s. 994109 SSSR, MKI4 B22D 27/04. Sposob polucheniya otlivok [*Method of obtaining castings*]. Novokhatskiy, I. A., Kisunko, V. Z., Vitkalov, I. S., Ladyanov, V. I. Opubl. 29.01.79, Byul. no. 5. [in Russian].
75. Arbenz, H. (1971) Jahresubersicht Leichtmetall-sand und Kokillenguss. Giesserei, vol. 66, no. 23, pp. 848–859. [in German].
76. Baliah, S., Srinivasan, M., Srinivasan, M., Seshardi. (1974) Dimensioning of plaster sleeved feeders for Al–4,5% Cu alloy. Casting, vol. 20, 21, no. 11, 12, pp. 25–27, 29, 31–36. [in English].
77. A.s. 1556812 SSSR, B22D 27/20. Sposob polucheniya otlivok iz alyuminievykh splavov [*Method for obtaining castings from aluminum alloys*]/ Belik, V. I., Kotlyarskiy, F. M., Borisov, G. P., Gavrish, V. S. Opubl. 15.04.90, Byul. no. 14. [in Russian].
78. Kotlyarskiy, F. M. (2013) Uproshchennyy RASLIT-protsess s povorotom formy [*Simplified process with rotary shape*]. Protsessy litya, no. 3, pp. 34–36. [in Russian].
79. Kotlyarskiy, F. M. (2012) Malookhodnoye kokilnoye lite [*Low-waste chill casting*]. Protsessy litya, no. 1, pp. 21–24. [in Russian].
80. Kotlyarskiy, F. M. (2017) Uproshchenie avtonomnogo pitayushchego ustroystva [*Simplify the stand-alone power supply*]. Protsessy litya, no. 2, pp. 39–44. [in Russian].

Поступила 14.09.2017