

УДК 669.715:621.746.6

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

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

О ЖИДКОТВЕРДОЙ ЗОНЕ В ЗАТВЕРДЕВАЮЩЕЙ ОТЛИВКЕ

Рассмотрены различные, в том числе оригинальные, оценки и механизмы участия жидко-твердой зоны в формировании структуры отливок и слитков.

Ключевые слова: сплавы, отливки, затвердевание, жидко-твердая зона, конвекция, центры кристаллизации, структура.

Розглянуто різні, в тому числі оригінальні, оцінки та механізми участі рідко-твердої зони в формуванні структури виливків та зливків.

Ключові слова: сплави, виливкі, тверднення, рідко-тверда зона, конвекція, центри кристалізації, структура.

Various, including original, assessments and mechanisms for the participation of a liquid-solid zone in the forming of the structure of castings and ingots are considered.

Keywords: alloys, castings, solidification, liquid-solid zone, convection, crystallization centers, structure.

Этот объект двухфазной области затвердевающей отливки был и остается в центре проблемных вопросов, касающихся конуса осаждения, центральной зоны равноосных кристаллов, ряда механизмов измельчения структуры: подплавление и разрушение дендритов, падение изолированных кристаллов с открытой поверхности отливки и др.

Еще в 1940 г. А. А. Бочвар и О. С. Жадаева предположили, что сжатие отливки в горизонтальных направлениях, определяющее линейную усадку, становится возможным только после образования жесткого кристаллического каркаса. Температура начала линейной усадки (T_y) делит область между ликвидусом и солидусом на две части: верхнюю, внутри которой первичные кристаллы отделены друг от друга жидкостью и в которой сплавы, находящиеся в жидкотвердом состоянии, обладают основным свойством жидкого тела принимать форму вмещающего сосуда, и нижнюю, внутри которой первичные кристаллы образуют жесткий каркас с распределенной внутри него жидкой фазой, в этом состоянии сплавы обладают свойством твердого тела сохранять ту форму, которая была ему ранее придана [1, с. 217].

Б. Б. Гуляев жидко-твердую часть двухфазной области характеризовал как зону макроскопических перемещений жидкого металла. В ее пределах твердые кристаллы свободно плавают в жидкости, а при выливании жидкого остатка удаляются вместе с ним, обнажая границу выливаемости [2].

Для сплавов системы Al–Si положение границы выливаемости определено Ю. А. Нехендзи [3], а границы начала линейной усадки – А. М. Корольковым [4]. И хотя обе эти границы связывают с образованием непрерывного каркаса кристаллов [1, 2], их положение на диаграмме состояния несколько различается [5] – первая ближе к ликвидусу и пересекает температурную линию эвтектики при 9 % Si, а вторая ближе к солидусу и пересекает линию эвтектики при 8 % Si.

В то же время это положение нельзя считать строгим хотя бы потому, что критическая концентрация твердой фазы для образования непрерывного каркаса зависит от формы кристаллов. Если сцепление разветвленных дендритов происходит вблизи температуры ликвидус при небольшом количестве затвердевшего металла, то для кристаллов глобулярной формы эта концентрация увеличивается, а сцепление смещается к температуре солидус [2, 3, 6]. Большую роль играет перемешивание. Так, для сплава Al+4%Si без перемешивания заливка возможна при 20 % твердой фазы, а после перемешивания – при 55 % [7, §8.3].

Для обычных условий литья силуминов с повышением содержания кремния от 1 до 10 % необходимое для создания прочного скелета количество твердой фазы изменяется соответственно от 10 до 40 % [8, 9]. Это значит, что на переднем крае фронта кристаллизации в температурном интервале от ликвидус до границы выливаемости вся выделившаяся твердая фаза (10–40 %) пребывает в виде обособленных кристаллов.

Таким образом, наличие жидко-твердой зоны не вызывает сомнения, как не вызывает сомнения и факт смыва этой зоны из поверхности затвердевающей корочки конвективным потоком [10] или потоком заполняющего форму расплава [5, с. 176]. Неподвижным остается фронт твердожидкой зоны, температура которого соответствует границе выливаемости. А поскольку на смену опустившейся (в слитке) жидко-твердой зоны сверху со стороны прибыли приходит расплав с более высокой температурой, близкой к температуре ликвидус, то при контакте этого расплава с фронтом твердо-жидкого состояния создается значительное переохлаждение (для доэвтектических силуминов разница между температурами ликвидус и выливаемости может достигать 20 °C), достаточное для зарождения новых центров кристаллизации. Что происходит дальше, хорошо представлено в работе [10, с. 60]. В процессе теплообмена на верхних горизонтах зоны двухфазного состояния возникают мелкие зародыши твердой фазы, которые медленно опускаются вдоль границы затвердевания в виде текущей взвеси (зона 1). По мере увеличения размера кристаллов достигается такая концентрация твердой фазы, при которой жидкость и твердые частицы опускаются с одинаковой скоростью, большей, чем в предыдущей зоне, наступает гравитационное перемещение кристаллов (зона 2). При увеличении объема кристаллов двухфазный поток перемещается в виде плотного по концентрации примесей слоя (зона 3). Вследствие неразрывности потока жидкостей в замкнутом объеме (изложнице) нисходящий поток вдоль границы затвердевания вызывает восходящий поток взвеси жидкого металла и кристаллов по оси слитка (зона 4).

Так продолжается до прекращения конвекции то ли из-за образования во всем незатвердевшем объеме слитка сплошного кристаллического каркаса, то ли несколько раньше из-за повышения вязкости суспензии до критического значения в соответствии с законом А. Энштейна [11, с. 64]. Затвердевшая в центральном объеме слитка суспензия образует зону равноосных кристаллов.

В. А. Ефимов не конкретизирует механизм зарождения обособленных кристаллов в жидко-твердой зоне. Отсутствовала такая конкретизация и при широком обсуждении образования конуса осаждения, хотя все участники объясняли это явление осаждением кристаллов, растущих свободно в расплаве перед фронтом кристаллизации [12, с. 53].

Одним из источников зародышей могут быть изолированные кристаллы, падающие с открытой поверхности отливки [11–13]. Процесс падения продолжается до тех пор, пока свободная поверхность не затянется сплошной коркой [12, с. 36]. Однако

последний тезис недостаточно корректен в свете экспериментов Н. И. Хворина с цилиндрическими слитками, затвердевающими в горизонтальном положении [14, с.187–189]. У всех таких слитков на верхней половине видны крупные дендриты, растущие сверху, а на нижней – очень тонкодисперсная структура, соответствующая глобулярным дендритам. То есть, несмотря на наличие в верхней части слитка толстой кристаллизующейся корки, из ее двухфазной области интенсивно опускались в нижнюю часть кристаллы жидко-твердой зоны.

В работах [12,15] Г. Ф. Баландин экспериментально исследовал рост корочки в расплавах алюминия и его сплавов на погружаемом в эти расплавы слабо окрашенном чугунном стержне диаметром 100 мм в зависимости от скорости его вращения и перегрева расплава. Продолжительность намораживания 3 с. На основании полученных результатов сделан вывод [12, с.160], что перегретый расплав при вынужденном движении около фронта кристаллизации оплавляет и частично разрушает кристаллы фронта. Затвердевание отливки в этих условиях было разделено на три протекающих одновременно процесса: собственно затвердевание корки, оплавление и разрушение ее перегретым расплавом. Поскольку представить такое сочетание одновременно протекающих процессов сложно, сам автор делает оговорку, что указанное разделение условно и его следует понимать как модель, которая позволяет предельно упростить соответствующие тепловые расчеты и изучить процессы оплавления и разрушения корки как самостоятельные.

Более простым и не менее интересным представляется процесс намораживания корочки на том же вращающемся стержне и в тех же, но неперегретых расплавах. В этом случае с ростом скорости вращения толщина корочки также уменьшается (расплавы АО, АЛ4 и АЛ19), что объяснено [15, с. 49] только разрушением (размыванием) движущимся потоком фронта кристаллов, растущих от поверхности стержня. Причем интенсивность этого разрушения увязана с прочностью металлов и сплавов у фронта затвердевания.

Опираясь на вышеприведенные данные, можно предложить альтернативную модель тех же процессов, суть которой в том, что рост фиксируемой корочки определяется перемещением фронта твердожидкого состояния (граница выливаемости), температура которого, в свою очередь, определяется равенством его прочности и разрушительной силы омывающего этот фронт потока расплава, зависящих от скорости вращения.

Согласно этому механизму рост корочки начинается не сразу с момента погружения в расплав вращающегося стержня, а лишь после того, как температура контактирующего с поверхностью стержня слоя расплава опустится до температуры, соответствующей границе выливаемости в данных условиях. До этого момента кристаллы, образующиеся в перемешиваемом вращающимся стержнем тонком слое переохлажденного расплава, растут обособленно, создавая жидкотвердую зону.

Чем больше скорость вращения стержня, тем ниже температура границы выливаемости, тем больше переохлаждение вступающих в контакт с этой границей новых порций расплава, что интенсифицирует зарождение центров кристаллизации, и тем больше времени уйдет на охлаждение расплава до этой температуры. Соответственно будет сокращаться «чистое время» роста корочки и ее толщина за установленные три секунды.

Таким образом рост корочки на равномерно вращающемся стержне не сопровождается ни оплавлением, ни разрушением, а приписываемый им эффект изменения толщины корочки с изменением скорости вращения стержня обеспечивается за счет смещения вверх или вниз температуры фронта твердожидкого состояния и соответственного уменьшения или увеличения количества твердой фазы в жидко-твердой зоне, часть которой уносится в ванну расплава под действием центробежной силы и конвекции, поэтому не участвует в формировании корочки. Причем эта часть, обогащая расплав затравками кристаллизации, с повышением скорости вращения будет увеличиваться.

При погружении вращающегося стержня в перегретый расплав утонению корочки будут способствовать два фактора: задержка начала образования корочки на время снятия перегрева расплава в приповерхностном слое и снижение скорости роста корочки из-за температурного градиента со стороны расплава.

При погружении вращающегося стержня в расплав технического алюминия будет происходить то же самое, только в роли двухфазной зоны окажется поверхностный слой корочки с неокрепшими связями кристаллов.

Оригинальный механизм взаимодействия твердожидких и жидко-твердых зон наблюдали при вертикальной вибрации открытого снизу и сверху кокиля. Такая технологическая схема выбрана в связи с тем, что классическая вертикальная вибрация кокиля не всегда достигает нужного результата. А. Оно [16, с. 83] помещал литровой стакан с водой на вибратор с амплитудой 0,6 мм и частотой 50 Гц. В стакан вводил несколько капель чернил. Несмотря на наличие очень мощных поверхностных колебаний, чернила в центральной области находились в застое и не рассеивались.

В нашем случае экспериментальные исследования выполнены на описанном в работе [17] вибрационном устройстве с фиксированными, благодаря эксцентриситету на валу, значениями амплитуды. Подача расплава снизу осуществлялась всасыванием по схеме, приведенной на рис. 1. Нижняя тонкостенная часть формы 2 выполняет роль металлопровода. Сверху форма закрыта крышкой 3, в которую врезаны три штуцера. С помощью насоса через штуцер 4 внутри формы создается разрежение, обеспечивающее подъем расплава 1 из ковша. Время заливки 4,5 с. Центральная часть крышки выполнена в виде колокольчика, который через штуцер 5 соединен с водяным манометром 8. Поднимающийся металл закупоривает щель между колокольчиком и формой и тем самым прерывает пневматическую связь между полостью колокольчика и вакуумной системой. Благодаря этому зеркало расплава останавливается у входа в колокольчик и в этот момент прекращается перемещение жидкости в манометре.

Наличие колокольчика дает возможность имитировать условия незамкнутого (открытого сверху и снизу) кокиля, поскольку над зеркалом расплава остается воздушная полость.

Результаты экспериментальных исследований, выполненных на сплаве Al+8%Si, заливаемом при температуре 750 °С, показывают, что в вибрирующей форме центральная часть отливки сохраняет подвижность по отношению к наружной корочке значительно дольше, чем в неподвижной. Об этом свидетельствует тот факт, что при снятии вакуума после охлаждения центральной части отливки ниже температуры, соответствующей образованию сплошного кристаллического каркаса в неподвижном кокиле, из вибрирующего кокиля вываливаются куски твердожидкой массы металла, а центральная часть отливки сдвигается вниз по отношению к наружной корочке (рис. 2).

Анализ внешнего вида и продольных сечений опытных образцов позволяет судить о механизме воздействия вибрации на процесс формирования отливки в незамкнутом кокиле. Пока весь металл находится в жидком состоянии (при заливке или сразу после заливки), он не может колебаться по всему объему вместе с формой, так как при выбранной конструкции кокиля инерционные силы гасят вибрацию в пристеночном слое. При снижении температуры пристеночного слоя до температуры выливаемости в данных условиях происходит сцепление затвердевающего сплава со стенкой

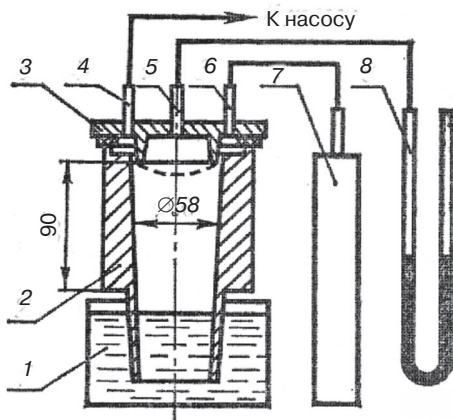


Рис. 1. Схема подачи расплава в кокиль снизу

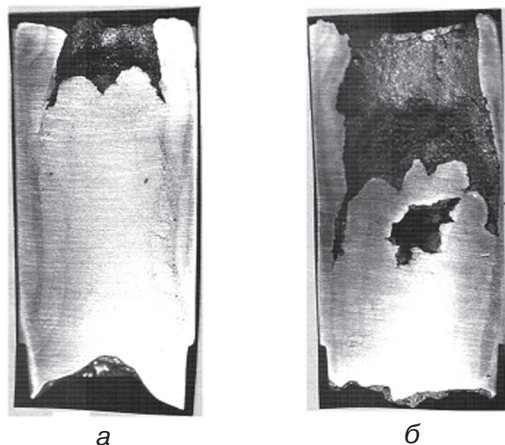


Рис. 2. Сечение отливок, полученных в незамкнутом кокиле, вибрирующем с амплитудой 2 мм: а – частота 20 Гц и выливание через 20 с с момента заливки; б – частота 30 Гц и выливание через 14 с с момента заливки

формы, и теперь уже образующаяся твердая корочка и прилегающая к ней достаточно прочная двухфазная зона начинают вибрировать вместе с формой, тогда как более удаленная от стенки центральная область отливки под действием сил инерции продолжает пребывать в относительно спокойном состоянии. Однако и после образования в затвердевающем поверхностном слое центральной области прочного кристаллического каркаса этот слой не сразу присоединяется к вибрирующей оболочке, поскольку связь между ними постоянно разрушается непрерывными возвратно-поступательными относительными перемещениями. Из-за неровности трущихся поверхностей ломка и перераспределение кристаллов в зоне скольжения наружных и внутренних слоев продолжается до тех пор, пока повышение концентрации твердой фазы не приведет к их прочному сцеплению. После этого к вибрирующей наружной части отливки присоединяется очередной слой центральной области, и далее все повторяется. Интенсивное разрушение и перераспределение кристаллов в зонах скольжения (своего рода жидко-твердые зоны) существенно сказывается на их составе и структуре, в результате чего на месте этих зон образуются ликвационные полосы. Повышение параметров вибрации интенсифицирует развитие описанных процессов и формирование полосчатого строения отливки (рис. 3, а–в).

Как видно, в разных ситуациях проявляются разные механизмы. Тем не менее, можно сделать предварительные выводы.

Жидко-твердая зона, подвергаясь воздействию естественных и искусственных потоков, обычно пребывает в миграционном состоянии.

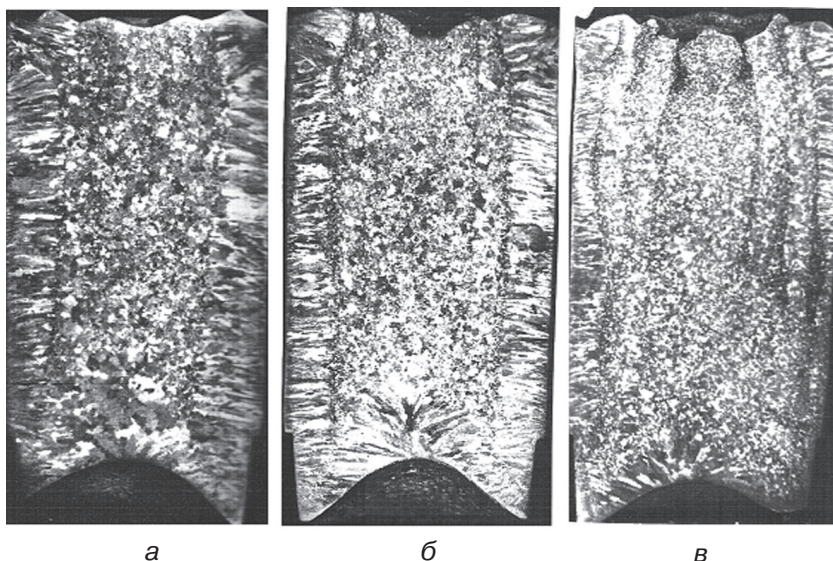


Рис. 3. Структура отливок, полученных в незамкнутом кокиле, вибрирующем с амплитудой 0,7 мм: а – частота 10 Гц; б – частота 20 Гц; в – частота 30 Гц

Обоснованы два механизма зарождения центров кристаллизации в жидко-твердой зоне:

- замещение смываемой жидко-твердой зоны новыми порциями расплава, имеющего после снятия перегрева температуру ликвидус, и переохлаждение его в контакте с поверхностью выливаемости (механизм замещения);
- увеличение количества затравок кристаллизации за счет расширения жидко-твердой зоны в сторону солидуса путем повышения скорости смывающего потока (механизм перераспределения).

Конечно же, ставить точку в рассматриваемом вопросе рано. Нет строгого доказательства (обоснования) образования жидко-твердой зоны. А. А. Бочвар только предположил ее существование. Последующие эксперименты подтвердили. Но всегда речь идет об образовании жесткого кристаллического каркаса. Насколько жесткого? В каждой ситуации потребуется своя жесткость, связанная с разрушительной силой смывающего потока. А если конвекции нет? Эксперимент в космосе. Куда сдвинется фронт твердожидкого состояния?

В работе [18], используя в качестве разрушающего фактора низкие металлотатические напоры, показано, что даже в заэвтектическом силумине кристаллический каркас образуется из, казалось бы, обособленных кристаллов кремния. Специальные металлографические исследования подтвердили, что это только на шлифах эти кристаллы кажутся обособленными, а в действительности они образуют очень слабенький каркас. Так, может, и для других сплавов, кристаллизующихся в интервале температур, при отсутствии разрушительных сил дендриту проще прорасти до температуры ликвидус при низких переохлаждениях порядка $0,1^{\circ}\text{C}$ [2, с. 65], чем дробиться на обособленные кристаллы, что, возможно, и происходит в реальных условиях на начальной стадии образования жидко-твердой зоны. В работе [14, с. 94] Н. И. Хворинов производил опыты по определению затвердевания стали, выпущенной из середины затвердевающей отливки и залитой затем в другую форму. Время затвердевания перелитой таким образом стали было таким же, как у стали, не имеющей перегрева, то есть не было обнаружено присутствие какой-либо доли твердой фазы в незатвердевшей стали. Следовательно, этот опыт не подтверждает наличия свободных кристаллов зародышевой величины в незатвердевшей части металла в отливках. Поэтому Н. И. Хворинов допускает отождествление границы кристаллизации с поверхностью изоликвидуса [14, с. 57, 65], тогда как В. А. Ефимов считает границей затвердевания поверхность раздела между зонами твердожидкого и жидко-твердого состояния, то есть поверхность выливаемости [10, с. 8, 28], а Г. Ф. Баландин в таких случаях использует обычно термин «двухфазная зона фронта кристаллизации» [12, с. 237].

Касаясь формирования равноосных кристаллов в центральной части отливки (слитка), в работе [16, с. 58] А. Оно приводит пять теорий, известных до 1970 г.:

- с помощью свободных резко охлажденных (замороженных) кристаллов, зарождающихся на стенке формы во время заливки;
- из частично переплавленных дендритов при пульсациях температуры расплава во время роста столбчатой зоны;
- зародыши, опускающиеся из свободной поверхности слитка;
- кристаллы зарождаются на стенке формы или на поверхности расплава, затем отделяются и осаждаются;
- кристаллы зарождаются в расплаве перед растущей поверхностью раздела жидкой и твердой фаз; требующееся переохлаждение объяснено как конституционное вследствие ликвации растворенного вещества у растущей поверхности раздела фаз.

Как видно, только в последней теории речь идет о жидко-твердой зоне, но нужно объяснить, почему ликваты не смываются конвективными потоками, достигающими скорости $0,5\text{ м/с}$ [10, с. 22]. Сам А. Оно придерживается 3 и 4 теорий.

По мнению И. Б. Куманина [11, с. 64], твердая фаза может попасть в жидкость внутренней области отливки с поверхности затвердевающего зеркала металла или в виде обломков столбчатых кристаллов, смываемых конвективным потоком.

Складывается впечатление, что рассматриваемый вопрос пребывает в стадии накопления экспериментального и аналитического материала.

Следует также обратить внимание на осторожное пользование диаграммой состояния при выборе сплавов, например, с гарантированной текучестью во всем интервале кристаллизации. Именно такую цель преследовали в работе [19, с. 126], выбирая вторичный сплав АК9 (8,9Si; 0,29%Mg; 0,24%Mn; 0,4%Fe) с температурой эвтектического затвердевания около 570 °С. В литературе [1, 6, 20] приведены данные, согласно которым в силумине с содержанием кремния более 8–9 % связанный кристаллический каркас в зоне двухфазного состояния не образуется даже при температурах, близких к эвтектической. Тем не менее, в процессе разливки при температуре 593 °С происходило схватывание суспензии, а часть сплава не выливалась из ковшика. По-видимому, здесь дело в примесях.



Список литературы

1. Бочвар А. А., Новиков И. И. О твердожидком состоянии сплавов разного состава в период их кристаллизации // Изв. АН СССР, ОТН. – 1952. – № 2. – С. 217–224.
2. Гуляев Б. Б. Теория литейных процессов. – Л.: Машиностроение, 1976. – 216 с.
3. Нехендзи Ю. А. Литейные свойства сплавов // Литейные свойства металлов и сплавов. – М., 1967. – С. 25–37.
4. Корольков А. М. Литейные свойства металлов и сплавов. – М.: АН СССР, 1960. – 196 с.
5. Борисов Г. П. Давление в управлении литейными процессами. – К.: Наукова думка, 1988. – 272 с.
6. Гуляев Б. Б. Литейные процессы. – М., Л.: Машгиз, 1960. – 416 с.
7. Тема НИР №129 «Исследовать влияние регулируемого давления на гидродинамические, теплофизические и фильтрационные процессы при формировании отливок из алюминиевых сплавов». Отчет № ГР81044576. – К.: ИПЛ АН УССР, 1985. – 319 с.
8. Магницкий О. Н., Гуляев Б. Б. Влияние условий затвердевания на формирование усадочных раковин в стальных отливках // Усадочные процессы в металлах. – М.: АН СССР, 1960. – С. 19–31.
9. Siegfried E., Leonhard H. Interdendritische speisung und warmrisserverhalten am Beispiel von Aluminium-Silicium-Legierungen // Gissereiforschung. – 1973. – Vol. 25, № 3. – pp. 101–113.
10. Ефимов В. А., Эльдарханов А. С. Физические методы воздействия на процессы затвердевания сплавов. – М.: Metallurgiya, 1995. – 272 с.
11. Куманин И. Б. Вопросы теории литейных процессов. – М.: Машиностроение, 1976. – 216 с.
12. Баландин Г. Ф. Формирование кристаллического строения отливок. – М.: Машиностроение, 1965. – 256 с.
13. Скребцов А. М., Дан Л. А., Киличкин В. В. Исследование воздействия на свободную поверхность затвердевающей отливки или слитка // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1995. – № 9. – С. 54–55.
14. Хворинов Н. И. Кристаллизация и неоднородность стали. – М.: Машгиз, 1956. – 392 с.
15. Баландин Г. Ф. Литье намораживанием. – М.: Машгиз, 1962. – 264 с.
16. Оно А. Затвердевание металлов. – М.: Metallurgiya, 1980. – 152 с.
17. Котлярский Ф. М. Формирование отливок из алюминиевых сплавов. – К.: Наукова думка, 1990. – 216 с.
18. Котлярский Ф. М., Борисов Г. П. О состоянии двухфазной области кристаллизующихся силуминов // Процессы литья. – 2006. – № 1. – С. 22–25.
19. Котлярский Ф. М. Водород в алюминиевых сплавах и отливках. – К.: Освіта України, 2011. – 208 с.
20. Бахтияров Р. А. О зависимости величины усадочной пористости в отливках от положения сплава на диаграмме состояния // Изв. АН ССР. ОТН Металлургия и топливо. – 1962. – № 4. – С. 62–69.



References

1. Bochvar, A. A., Novikov, I. I. (1952) O tverdozhidkom sostoyanii splavov raznogo sostava v period ikh kristallizatsii [On the solid-liquid state of alloys of different composition in the period of their crystallization]. Izv. AN SSSR, OTN, no. 2, pp. 217–224. [in Russian].
2. Gulyaev, B. B. (1976) Teoriya liteynykh protsessov [Theory of foundry processes]. L.: Mashinostroenie, 216 p. [in Russian].
3. Nekhendzi, Yu. A. (1967) Liteynye svoystva splavov [Foundry properties of alloys]. Liteynye svoystva metallov i splavov. Moscow, pp. 25–37. [in Russian].
4. Korolkov, A. M. (1960) Liteynye svoystva metallov i splavov [Foundry properties of metals and alloys]. Moscow: AN SSSR, 196 p. [in Russian].
5. Borisov, G. P. (1988) Davlenie v upravlenii liteynymi protsessami [Pressure in the management of foundry processes]. K.: Naukova dumka, 272 p. [in Russian].
6. Gulyaev, B. B. (1960) Liteynye protsessy [Foundry processes]. Moscow, L.: Mashgiz, 416 p. [in Russian].
7. Tema NIR no. 129 «Issledovat vliyanie reguliruемого davleniya na gidrodinamicheskie, teplofizicheskie i filtratsionnye protsessy pri formirovanii otlivok iz alyuminiyevykh splavov». Otchet no. GR81044576. K.: IPL AN USSR, 1985, 319 p. [in Russian].
8. Magnitskiy, O. N., Gulyaev, B. B. (1960) Vliyanie usloviy zatverdevaniya na formirovanie usadochnykh rakovin v stalnykh otlivkakh [Effect of solidification conditions on the formation of shrinkage shells in steel castings]. Usadochnye protsessy v metallakh. Moscow: AN SSSR, pp. 19–31. [in Russian].
9. Siegfried, E., Leonhard, H. (1973) Interdendritische speisung und warmrisverhalten am Beispiel von Aluminium-Silicium-Legierungen. Gissereiforschung, Vol. 25, no. 3, pp. 101–113. [in Russian].
10. Yefimov, V. A., Eldarkhanov, A. S. (1995) Fizicheskie metody vozdeystviya na protsessy zatverdevaniya splavov [Physical methods of influence on the solidification of alloys]. Moscow: Metallurgiya, 272 p. [in Russian].
11. Kumanin, I. B. (1976) Voprosy teorii liteynykh protsessov [Questions of the theory of foundry processes]. Moscow: Mashinostroenie, 216 p. [in Russian].
12. Balandin, G. F. (1965) Formirovanie kristallicheskogo stroeniya otlivok [Formation of the crystalline structure of castings]. Moscow: Mashinostroenie, 256 p. [in Russian].
13. Skrebtsov, A. M., Dan, L. A., Kilochkin, V. V. (1995) Issledovanie vozdeystviya na svobodnuyu poverkhnost zatverdevayushchey otlivki ili slitka [Investigation of the effect on the free surface of a hardening casting or ingot]. Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya, no. 9, pp. 54–55. [in Russian].
14. Khvorinov, N. I. (1956) Kristallizatsiya i neodnorodnost stali [Crystallization and heterogeneity of steel]. Moscow: Mashgiz, 392 p. [in Russian].
15. Balandin, G. F. (1962) Lite namorazhivaniem [Freezing molding]. Moscow: Mashgiz, 264 p. [in Russian].
16. Ono, A. (1980) Zatverdevanie metallov [Hardening of metals]. Moscow: Metallurgiya, 152 p. [in Russian].
17. Kotlyarskiy, F. M. (1990) Formirovanie otlivok iz alyuminiyevykh splavov [Formation of castings from aluminum alloys]. K.: Naukova dumka, 216 p. [in Russian].
18. Kotlyarskiy, F. M., Borisov, G. P. (2006) O sostoyanii dvukhfaznoy oblasti kristallizuyushchikhsya siluminov [On the state of the two-phase region of crystallizing silumin]. Protsessy litya, no. 1, pp. 22–25. [in Russian].
19. Kotlyarskiy, F. M. (2011) Vodorod v alyuminiyevykh splavakh i otlivkakh [Hydrogen in aluminum alloys and castings]. K.: Osvita Ukrayini, 208 p. [in Russian].
20. Bakhtiarov, R. A. (1962) O zavisimosti velichiny usadochnoy poristosti v otlivkakh ot polozheniya splava na diagramme sostoyaniya [On the dependence of the shrinkage porosity in the castings on the position of the alloy on the phase diagram]. Izv. AN SSR. OTN Metallurgiya i toplivo, no. 4, pp. 62–69. [in Russian].

Поступила 03.10.2017