
ЗАТВЕРДЖЕННЯ СПЛАВІВ

УДК 669.18:621.746

В. А. Мамишев

Фізико-технологічний інститут металів і сплавів НАН України, Київ

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ЗАТВЕРДЖЕННЯ ЛИТИХ ЗАГОТОВОК С ПЕРЕМЕННОЮ КРИВИЗНОЮ ГРАНИЦЬ ДВУХФАЗНОЇ ЗОНИ

Виконано системний аналіз впливу кривизни рухомих границь двофазної зони на процес затвердження отливок, слитків і безперервнолитих заготовок різної геометрії.

Ключевые слова: литая заготовка, процесс затвердевания, кривизна изотерм солидуса.

Виконано системний аналіз впливу кривизни рухомих границь двофазної зони на процес тверднення виливків, зливків та безперервнолитих заготовок різної геометрії.

Ключові слова: лита заготовка, процес тверднення, кривизна ізотерм солідусу.

Was executed the system analysis of influence of motile confines crookedness of the two-phase zone on the process solidification of castings, ingots and billets of continuous cast a different geometry.

Keywords: cast billet, process of solidification, crookedness of solidus isotherm.

Фазовий перехід високотемпературних узко- і широкоінтервальних металічних сплавів із рідкого стану в тверде відбувається в двофазній зоні литих заготовок по різних схемах затвердження [1-8]. В двофазній зоні фасонних отливок, прокатних і кузнечних слитків, заготовок центробежного, неперервного і полунеперервного лиття синхронно протікають два самоорганізуючихся процеси: кристалізація і затвердження.

Термічески сопряженні процеси затвердження литих заготовок в двофазній зоні і кристалізації сплавів в температурному інтервалі ліквідус-солідус двофазної зони взаємозв'язані. Однак, процес затвердження отливок, слитків і безперервнолитих заготовок в градієнтному (пространствено неоднорідному) температурному полі являється вівідчим по відношенню до процесу кристалізації металічних сплавів. Для пошуку раціональних термовремених і технологічних параметрів лиття актуально вивчати кінетичні закономірності процесів затвердження литих заготовок і кристалізації інтервальних сплавів з використанням ефективних методів системних досліджень [9].

Для пріоритетного розвитку перспективних технологій лиття необхідно на загальній методическій основі здійснити синтез теорій затвердження отливок і слитків, і теорій кристалізації металів, і інтервальних сплавів [10-21].

Затвердевание сплавов

Поэтому выполнен [22-24] системный анализ режимов захлаживания и перемешивания гетерогенного расплава, кристаллизующегося в двухфазной зоне литых заготовок с разной кинетикой затвердевания.

Теплофизический процесс затвердевания литых заготовок реализуется в двухфазной зоне с выделением скрытой теплоты кристаллизации стали, чугуна, бронзы, латуни, силумина или другого сплава, а физико-химический процесс кристаллизации интервальных сплавов происходит между температурами ликвидуса и солидуса сплава с образованием дендритной или недендритной кристаллической структуры литого металла в двухфазной зоне затвердевающей отливки, слитка или заготовки непрерывного литья [1-24].

В процессе затвердевания литой заготовки между подвижными фронтами ликвидуса и солидуса образуются градиентные слои жидко-твердого и твердо-жидкого состояния сплава, кристаллизующегося в неоднородном температурном поле. При формировании слитков и отливок фронт ликвидуса $F_{лик}$ находится между жидкой сердцевиной литой заготовки и жидко-твердым слоем двухфазной зоны, а фронт солидуса $F_{сол}$ – между областью полностью затвердевшего металла и твердо-жидким слоем двухфазной зоны.

Фронт затвердевания (изотерма солидуса) в ограниченном объеме формирующейся отливки или слитка продвигается к их тепловому центру с переменной скоростью в условиях нестационарного теплопереноса с изменением во времени локальных значений температуры двухфазной зоны [25], тогда как при вытягивании непрерывнолитой заготовки из кристаллизатора фронт ее затвердевания продвигается к плоскости или оси симметрии температурного поля с постоянной скоростью в условиях квазистационарного теплообмена в системах заготовка-кристаллизатор и непрерывнолитая заготовка-окружающая среда без изменения во времени локальных значений температуры двухфазной зоны [7].

Кинетика затвердевания непрерывнолитой заготовки в полости водоохлаждаемого кристаллизатора отличается от кинетики затвердевания слитка в чугунолитейной изложнице и кинетики затвердевания отливки в песчаной форме или кокиле. Неодинаковая кинетика затвердевания отливок, слитков, центробежно- и непрерывнолитых заготовок разной геометрии наиболее отчетливо проявляется на заключительной стадии их формирования. В качестве простого и наглядного примера это иллюстрируют схемы затвердевания (рис. 1) заготовок непрерывного литья с прямоугольным и круглым профилями поперечного сечения.

Скорость вытягивания заготовки из кристаллизатора синхронизирована со скоростью наполнения полости кристаллизатора жидким металлом. Поэтому двухфазная зона непрерывнолитой заготовки находится на не изменяющемся расстоянии от фиксированного уровня зеркала расплава в полости кристаллизатора, что подтверждают схемы затвердевания плоской и цилиндрической заготовок, приведенные на рис. 1, а, б. Установившийся во времени процесс теплообмена реализуется при постоянной $v = \text{const}$ скорости вытягивания сляба или блюмса из кристаллизатора в условиях непрерывного литья железоуглеродистых сплавов (сталь, чугун) и сплавов на основе алюминия, меди и других металлов между затвердевающей непрерывнолитой заготовкой и стенками кристаллизатора.

Так как фронт ликвидуса $F_{лик}$ отделяет двухфазную зону кристаллизации от жидкой части непрерывнолитой заготовки (жидкой лунки), а фронт солидуса $F_{сол}$ – двухфазную зону от твердой части затвердевающей заготовки, то положение внутренней и внешней границ двухфазной зоны и форма изотерм ликвидуса и солидуса не изменяются при постоянной скорости вытягивания заготовки из кристаллизатора. От формы изотерм начала и окончания процесса затвердевания температурно-неоднородной непрерывнолитой заготовки зависят высота жидкой лунки и протяженность двухфазной зоны кристаллизации сплава.

Графическое представление жидкой лунки в неподвижной системе координат xOz эквивалентно кинетике продвижения внутренней границы двухфазной зоны кристаллизации (фронт ликвидуса) к плоскости или оси тепловой симметрии непрерывнолитой заготовки в ее продольном сечении. Поэтому геометрия криволинейной

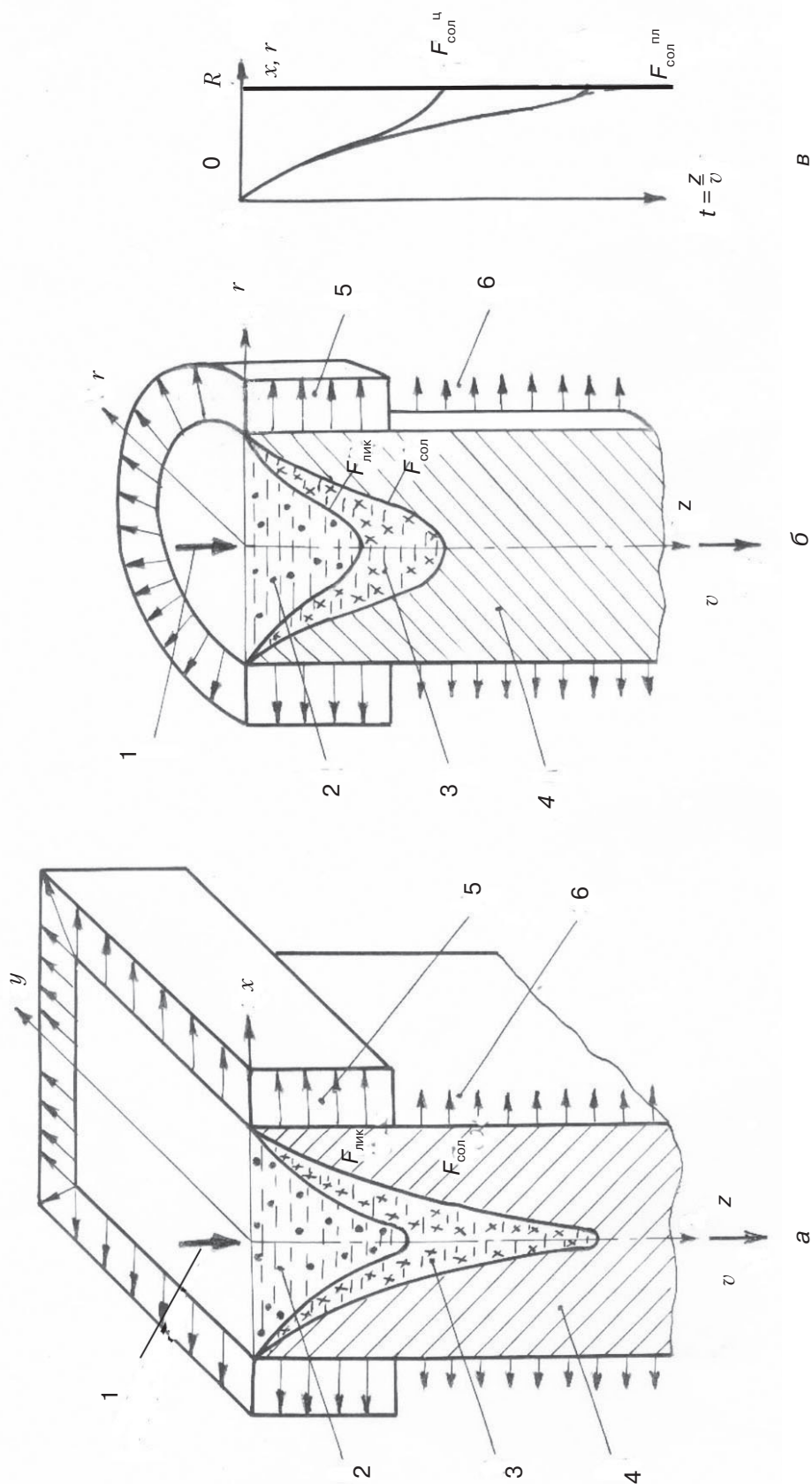


Рис. 1. Затвердевание заготовок разной геометрии в условиях квазистационарного теплообмена: а – при непрерывном литье прямоугольных слэбов, б – при полунепрерывном литье круглых слитков; в – кинетика затвердевания плоских и цилиндрических заготовок с разной кривизной изотерм солидуса; 1 – подача расплава и микроаллоидильников, 2 – жидкая лунка, 3 – жидкая лунка, 4 – затвердевшая зона, 5 – теплоотвод в стенки водоохлаждаемого кристаллизатора, 6 – теплоотвод в зоне вторичного охлаждения

Затвердевание сплавов

границы жидкой лунки заготовки непрерывного литья отражает форму кинетической кривой продвижения во времени изотермы ликвидуса двухфазной зоны. Так как кинетика продвижения внешней границы двухфазной зоны (фронт солидус) – это закономерность увеличения во времени толщины затвердевшего слоя (твердой корки) литого металла, то геометрия криволинейной изотермы солидуса отражает форму кинетической кривой затвердевания непрерывнолитой заготовки.

Если в осевом сечении непрерывнолитой заготовки продольную координату $z = v t$ разделить на постоянную скорость ее вытягивания из кристаллизатора, то получим текущее время затвердевания. Вдоль технологической оси МНЛЗ координата z пропорциональна времени t , поэтому геометрическая форма изотерм ликвидуса $F_{лик}$ и солидуса $F_{сол}$ на рис. 1 воспроизводит (в масштабе) конфигурацию кинетических кривых (рис. 1, в) продвижения во времени фронтов начала и конца затвердевания непрерывнолитых заготовок разной геометрии (слябов, блюмсов или заготовок круглого сечения).

Из схем затвердевания на рис. 1 следует, что кинетика затвердевания прямоугольного сляба или блюмса в кристаллизаторе машины непрерывного [20] литья заготовок (МНЛЗ) отличается от кинетики затвердевания цилиндрического слитка в кристаллизаторе машины полунепрерывного [8] литья заготовок (МПНЛЗ) значительным ускорением процесса затвердевания круглых заготовок по сравнению с затвердеванием плоских заготовок. Это можно объяснить сильным влиянием изменяющейся во времени кривизны изотермы солидуса (фронт затвердевания) на температурные поля литых заготовок разной геометрии.

Влияние переменной кривизны подвижных фронтов затвердевания на температурные поля отливок, слитков, центробежно- и непрерывнолитых заготовок учтено при разработке обобщенной математической модели затвердевания [26, 27]. Процессы нестационарного и квазистационарного теплопереноса в ограниченном объеме затвердевающих заготовок разной геометрии и габаритных размеров можно описать дифференциальными уравнениями математической физики в частных производных, которые получены в следующем виде:

– нелинейное уравнение нестационарного теплопереноса в поперечном сечении затвердевающей отливки или слитка

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a_3 \left(\Delta T - k_F G_T - K_3 G_T^2 \right); \quad \Delta T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}; \quad x < R_x, y < R_y; \quad (1)$$

– нелинейное уравнение квазистационарного теплопереноса в продольном сечении затвердевающей заготовки непрерывного литья

$$\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{a_3}{v} \left(\Delta T - k_F G_T - K_{\lambda_3} G_T^2 \right); \quad \Delta T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}; \quad x < R_x, z > 0, \quad (2)$$

где T – температура, °С; t – время, с; r, x, y, z – координаты, м; R_x, R_y – полутолщина (радиус) и полуширина заготовки, м; $K_F = \left. \frac{dS}{dV} \right|_F$ – кривизна изотерм [26] (в плоском

слое $k_1 = 0$, в цилиндрическом $k_2 = 1/r$, в шаровом $k_3 = 2/r$); где S – площадь фронта солидуса, м²; V – объем, ограниченный фронтом затвердевания, м³; G_T – градиент температуры, К/м; ΔT – лапласиан плоского температурного поля [26], м; $a_3 = \lambda_3 / C_3$ – эффективная температуропроводность сплава, м²/с; λ_3, C_3 – эффективная теплопроводность, Вт/(м · К) и объемная теплоемкость сплава, Дж/(м³ · К); $K_{\lambda_3} = -\frac{1}{\lambda_3} \frac{\partial_3}{\partial T}$

Затвердевание сплавов

– температурный коэффициент прироста теплопроводности сплава, K^{-1} ; v – скорость вытягивания непрерывнолитой заготовки из кристаллизатора, м/с.

Из дифференциальных уравнений нестационарного (1) и квазистационарного (2) теплопереноса в ограниченном объеме отливки, слитка или заготовки непрерывно-го литья следует важный для практики вывод: чем сильнее изменяется во времени кривизна k_F подвижной изотермы солидуса (кривизна фронта затвердевания), тем больше кинетика затвердевания литой заготовки отклоняется от классического закона квадратного корня, который получен, как отмечено в работах [10, 11, 13, 15], для случая затвердевания полуграниченного плоского тела при постоянной температуре кристаллизации расплава. В этом наиболее простом случае затвердевания металлического расплава кривизна плоского фронта затвердевания равна нулю $k_F = k_1 = 0$, и температурный интервал кристаллизации ликвидус-солидус тоже равен нулю $\Delta T_{кр} = T_{лик} - T_{сол} = 0$, что позволяет лишь приближенно учесть термовременные условия затвердевания литых заготовок разной массы и геометрии при неизотермической кристаллизации интервальных сплавов в двухфазной зоне.

Как следует из схемы (рис. 2), при компьютерном прогнозировании [28–32] локальных значений градиента температуры G_T и локальных значений интенсивности (скорости) охлаждения I_T двухфазной зоны легче контролировать степень заохлаживания кристаллизующихся интервальных сплавов, а при компьютерной оптимизации локальных значений скорости затвердевания $V_{сол}$ слитков, отливок и непрерывнолитых заготовок легче регулировать интенсивность активного перемешивания гетерогенного расплава в полости изложницы, литейной формы или кристаллизатора МНЛЗ с помощью термического [22, 33] критерия оптимальности двухфазной зоны (термического критерия качества литья), который удобно представить в безразмерном виде: $\min \left(I_T / (v_{кр} G_T) \right) \Big|_{F_{сол}} > 1$.

Системный анализ затвердевания отливок, слитков и непрерывнолитых заготовок показал, что совмещение [24, 33] принципиально разных схем суспензионной разливки и направленного затвердевания в высокоэффективный технологический процесс гетеролитья позволяет улучшить качество кристаллической структуры внутренних слоев литого металла. Реотермический эффект расслоения суспензии расплав-кристаллы приводит к седиментации (осаждению) микрохолодильников и обломков дендритов в жидко-твердом слое двухфазной зоны, что ускоряет затвердевание литых заготовок в режиме осадочной кристаллизации [34], а реотермический эффект вытеснения из твердо-жидкого слоя двухфазной зоны легкоплавких ликватов с высокой концентрацией вредных примесей позволяет их удалять в режиме питающе-рафинирующей подпитки [35] капиллярно-пористого кристаллического каркаса доливкой в прибыль жидкого металла с меньшей концентрацией вредных примесей.

Чтобы повысить качество кристаллической структуры поверхностных слоев литых заготовок и уровень их служебных свойств, можно на стадии затвердевания расплава сформировать сплошную оболочку плотного металла с внутренними ребрами жесткости, которые способствуют структурно-упрочняющему армированию литых изделий. Для этого в стенках низкотеплопроводной сухой, сырой или частично замороженной песчаной формы (или стержня) можно разместить высокотеплопроводные теплоотборники каркасного типа с положительной, отрицательной или нулевой кривизной их рабочих поверхностей [36], которые на поверхности литых изделий образуют вогнутые, выпуклые или гладкие участки. Дискретные торцы металлических теплоотборников каркасного типа имеют прямолинейные, криволинейные или локальные (точечные) участки теплового контакта с поверхностью затвердевающей заготовки. За счет формирования структурно-армирующих литых ребер жесткости можно повысить конструктивную прочность литых деталей и уменьшить их массу.

С помощью системного анализа выявлены [24, 37, 38] реотермическая природа процессов формирования первичной структуры литых изделий при кристаллизации сплавов; особенности трансформации первичной кристаллической структуры



Рис. 2. Системное управление реотермическим процессом формирования литой структуры в двухфазной зоне отливок, слитков и непрерывнолитых заготовок

во вторичную при термической обработке литых заготовок разного назначения; литейно-металлургические и системные принципы управления качеством литой структуры отливок, слитков и непрерывнолитых заготовок и конструктивно-технологические схемы их реализации.

На разных уровнях системного анализа многофакторных реотермических процессов литья, включая математический, физический, физико-химический, структурный и технологический уровни системных исследований, выполнен комплексный теоретический анализ различных схем затвердевания фасонных отливок, кузнечных, прокатных и трубных слитков, центробежно- и непрерывнолитых заготовок. В результате [21-38]:

- на математическом уровне системного исследования температурных полей в сложной системе литая заготовка-литейная оснастка-окружающая среда разработана методика прогнозирования локальных градиентов температуры и скоростей охлаждения кристаллизующегося расплава для оптимизации скоростей затвердевания слитков и отливок;

- на физическом уровне системного исследования фазовых переходов в двухфазной зоне крупных литых заготовок, затвердевающих в условиях интенсивного

Затвердевание сплавов

перемешивания и захлаживания расплава, проведен поиск эффективных динамических, физико-химических и теплофизических внешних воздействий на жидкий и кристаллизующийся металл;

– на физико-химическом уровне системного исследования ликвационных процессов в двухфазной зоне кристаллизации интервальных сплавов разработана методика расчетной оценки ширины зон внецентренной и осевой химической неоднородности в затвердевающих слитках и массивных отливках с помощью термического критерия качества литья;

– на структурном уровне системного исследования процесса кристаллизации сплавов разработаны механизм гетерофазного структурирования разобщенных кристаллов в жидко-твердом слое двухфазной зоны и механизм гетерогенного структурообразования в кристаллическом каркасе твердо-жидкого слоя двухфазной зоны затвердевания;

– на технологическом уровне системного исследования реотермических режимов литья осуществлен поиск эффективных литейно-металлургических принципов улучшения качества внутренних и поверхностных слоев литых изделий разной массы и конфигурации с повышенными физико-механическими и функциональными свойствами литого металла.

Используя системные принципы реотермической теории управления качеством литой структуры, в соответствии с рис. 2 можно осуществлять научно-обоснованный выбор наиболее рациональных в конкретных условиях производства путей совершенствования литейно-металлургических технологий получения отливок, слитков и непрерывнолитых заготовок разной массы и конфигурации на основе создания новых схем затвердевания литых изделий с целью повышения их конкурентоспособности на мировом рынке.



Список литературы

1. *Ефимов В. А.* Разливка и кристаллизация стали. – М.: Metallurgy, 1976. – 539 с.
2. *Скребцов А. М.* Конвекция и кристаллизация металлического расплава в слитках и отливках. – М.: Metallurgy, 1993. – 143 с.
3. *Флеминг М.* Процессы затвердевания. – М.: Мир, 1977. – 423 с.
4. *Анисович Г. А.* Затвердевание отливок. – Минск: Наука и техника, 1979. – 232 с.
5. *Малевиц Ю. А., Самойлович Ю. А.* Теплофизические основы затвердевания отливок и слитков. – Минск: Вышэйшая школа, 1989. – 203 с.
6. *Шмрга Л.* Затвердевание и кристаллизация стальных слитков. – М.: Metallurgy, 1985. – 248 с.
7. *Сворцов А. А., Акименко А. Д.* Теплопередача и затвердевание стали в установках непрерывной разливки. – М.: Metallurgy, 1966. – 190 с.
8. *Марченко И. К., Мошкевич Е. И.* Производство стальных слитков полунепрерывным литьем. – Киев: Техніка, 1981. – 158 с.
9. *Самойлович Ю. А.* Системный анализ кристаллизации слитка. – Киев: Наук. думка, 1983. – 248 с.
10. *Вейник А. И.* Тепловые основы теории литья. – М.: Mashgiz, 1953. – 383 с.
11. *Вейник А. И.* Теория затвердевания отливки. – М.: Mashgiz, 1960. – 435 с.
12. *Баландин Г. Ф.* Основы теории формирования отливки. – М.: Машиностроение, 1976. – Ч. 1, – 328 с.; 1979. – Ч. 2. – 335 с.
13. *Рыжиков А. А.* Теоретические основы литейного производства. – М.; Л.: Mashgiz, 1961. – 446 с.
14. *Пржибыл Й.* Теория литейных процессов. – М.: Мир, 1967. – 328 с.
15. *Гуляев Б. Б.* Теория литейных процессов. – Л.: Машиностроение, 1976. – 214 с.
16. *Куманин И. Б.* Вопросы теории литейных процессов. – М.: Машиностроение, 1976. – 216 с.
17. *Чалмерс Б.* Теория затвердевания. – М.: Metallurgy, 1968. – 288 с.
18. *Любов Б. Я.* Теория кристаллизации в больших объемах. – М.: Наука, 1975. – 256 с.

Затвердевание сплавов

19. Борисов В. Т. Теория двухфазной зоны металлического слитка. – М.: Metallurgia, 1987. – 224 с.
20. Теория непрерывной разливки. Технологические основы / В. С. Рутес, В. И. Аскольдов, Д. П. Евтеев и др. – М.: Metallurgia, 1971. – 296 с.
21. Мамишев В. А. О прикладных вопросах реотермической теории управления качеством литой структуры // Интенсификация литейных технологий. – Киев: ИПЛ АН УССР, 1989. – С. 77-82.
22. Мамишев В. А. Системный анализ качества слитков и отливок с позиций реотермической теории // 50 лет в Академии наук Украины: ИЛП, ИПЛ, ФТИМС – прошлое, настоящее, будущее. – Киев: ФТИМС НАН Украины, 2008. – С. 142-145.
23. Мамишев В. А., Шинский О. И., Соколовская Л. А. Системный анализ процесса затвердевания литых заготовок разной массы и назначения // Процессы литья. – 2010. – № 1. – С. 20-24.
24. Мамишев В. А. Реотермическая концепция управления кристаллическим строением литых изделий // Там же. – 2004. – № 3. – С. 43-48.
25. Мамишев В. А., Ефимов В. А., Осипов В. П., Соколовская Л. А. О пространственно-временной эволюции двухфазной зоны слитка // Прогрессивные способы получения стальных слитков. – Киев: ИПЛ АН УССР, 1980. – С. 202-204.
26. Мамишев В. А. Методика расчета термовременных параметров затвердевания литых заготовок разной конфигурации // Процессы литья. – 2008. – № 5. – С. 43-49.
27. Мамишев В. А. Обобщенный алгоритм расчета нестационарных температурных полей при затвердевании слитков и отливок разной геометрии // Там же. – 2008. – № 6. – С. 38-44.
28. Мамишев В. А., Соколовская Л. А. О прогнозировании градиентов температуры в поверхностных и внутренних слоях затвердевающей заготовки методом вычислительного эксперимента на ЭВМ // Состояние и перспективы развития биметаллического и многослойного литья. – Киев: ИПЛ АН УССР, 1991. – С. 119-122.
29. О физико-математическом обосновании реотермического критерия оптимального управления зонами двухфазного состояния / В. А. Мамишев, В. А. Ефимов, В. П. Осипов и др. // Теплофизика стального слитка. – Киев: ИПЛ АН УССР, 1980. – С. 94-98.
30. Мамишев В. А., Соколовская Л. А. О математическом прогнозировании темпа кристаллизации железоуглеродистых сплавов применительно к оптимизации двухфазной зоны затвердевания // Физико-химические воздействия на кристаллизацию стали. – Киев: ИПЛ АН УССР, 1982. – С. 12-18.
31. О применимости термического критерия качества литья для определения ширины зоны шнуровой ликвации / В. А. Мамишев, Ю. Я. Скок, Л. А. Соколовская и др. // Совершенство процессов непрерывной разливки стали. – Киев: ИПЛ АН УССР, 1985. – С. 35-37.
32. Мамишев В. А., Соколовская Л. А. О теоретическом прогнозировании термических условий повышения качества макроструктуры и эффективности затвердевания стальных слитков и слябов // Процессы разливки и кристаллизации стали. – Киев: ИПЛ АН Украины, 1991. – С. 72-82.
33. Мамишев В. А. О литейно-металлургических принципах повышения качества литой структуры слитков с позиций реотермической теории // Проблемы стального слитка. – Киев: ИПЛ АН УССР, 1988. – С. 43-46.
34. Мамишев В. А. О реотермическом совмещении процессов суспензионной разливки и направленного затвердевания в режиме осадочной кристаллизации и рафинирующей подпитки // Физические методы моделирования разливки и кристаллизации стали. – Киев: ИПЛ АН УССР, 1990. – С. 16-19.
35. Мамишев В. А. О выборе толщины напорного участка питающерафинирующей прибыли слитка с помощью термического критерия качества литья // Процессы разливки стали и качество слитка. – Киев: ИПЛ АН УССР, 1989. – С. 40-45.
36. Мамишев В. А. О повышении эффективности теплообмена в системе “литая заготовка-форма-окружающая среда” // Металл и литье Украины. – 2012. – № 11. – С. 31-35.
37. Мамишев В. А. Особенности механизма реотермической обработки кристаллизующихся сплавов // Metallургическая и горнорудная промышленность. – 2006. – № 7. – С. 212-215.
38. Мамишев В. А. Реотермическая природа совмещенных технологических схем гетеролитья // Процессы плавки, обработки и разливки металлов: отливки, слитки, заготовки. – Киев: ФТИМС НАН Украины, 2006. – С. 34-37.

Поступила 10.12.2013