
ЗАТВЕРДЕВАНИЕ СПЛАВОВ

УДК 669.18: 621.746

В. А. Мамишев

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

СИСТЕМНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕОТЕРМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ СПЛАВОВ

Выполнен системный анализ течения гетерогенного расплава и теплообмена в двухфазной зоне кристаллизации интервальных сплавов в процессе затвердевания литых заготовок.

Ключевые слова: *двухфазная зона, течение, теплообмен, реотермические процессы*

Виконано системний аналіз течії гетерогенного розплаву та теплообміну в двофазній зоні кристалізації інтервальних сплавів в процесі тверднення литих заготовок.

Ключові слова: *двофазна зона, течія, теплообмін, реотермічні процеси*

It is executed the system analysis of the flow heterogeneous melt and heat-exchange in two-phase zone crystallization of the interval alloys in process of the solidification cast billets.

Keywords: *two-phase zone, flow, heat exchange, rheothermal processes*

На современном этапе приоритетного развития перспективных металло-, материало- и энергосберегающих, экологически безопасных и экономически выгодных технологий литья актуально [1-8] совершенствовать прогрессивные технологии в металлургии и литейном производстве и создавать принципиально новые эффективные технологические схемы литья для получения высококачественных литых изделий разного назначения.

В процессе затвердевания слитков и отливок расплав кристаллизуется в неоднородном температурном поле, которое является [9-12] неравномерным по толщине (радиусу) и высоте литой заготовки и нестационарным во времени. Пространственно-временная эволюция неоднородных температурных полей в сложных теплотехнических системах отливка-форма, слиток-изложница и заготовка-кристаллизатор влияет на самоорганизующиеся термически взаимосвязанные процессы затвердевания и кристаллизации.

Неизотермическим условиям затвердевания слитков, отливок, заготовок центробежного и непрерывного литья соответствуют неустановившийся или установившийся режим течения расплава и нестационарный или квазистационарный режим теплообмена в температурном интервале ликвидус-солидус кристаллизующегося сплава. Интенсивность процессов течения и теплообмена в жидкой сердцевине и затвердевающих слоях литых заготовок разной массы влияют [13, 14] на температура-

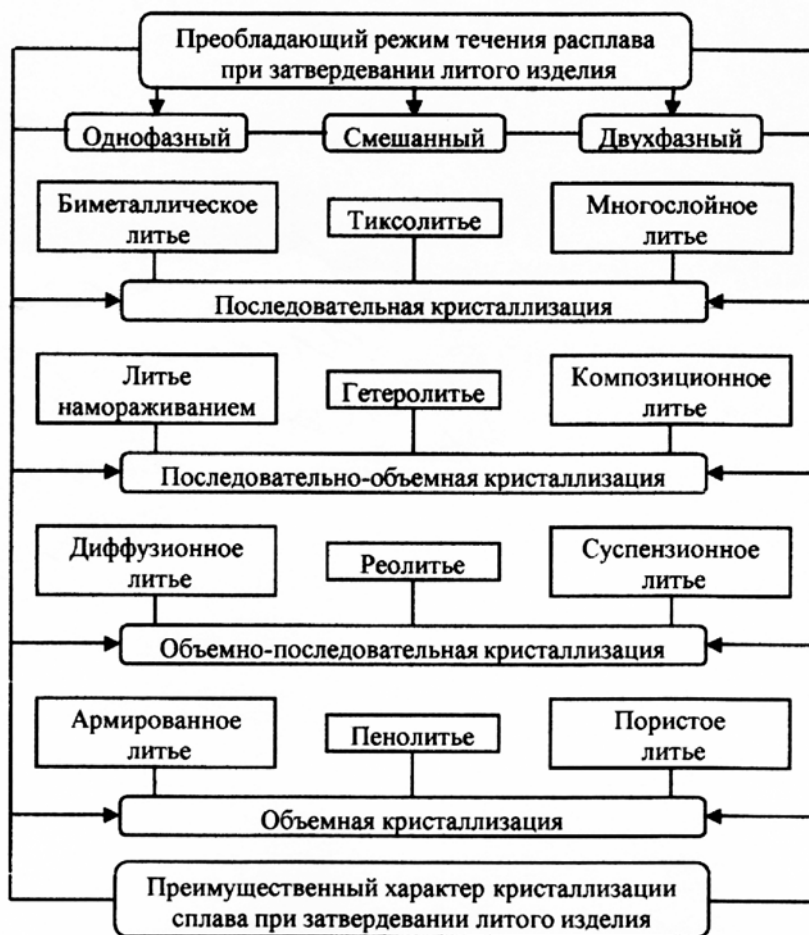
Затвердевание сплавов

турные условия формирования кристаллического строения литых изделий и степень развития дефектов затвердевания в зонах химической, физической и структурной неоднородности [15, 16] литого металла.

В технологических схемах затвердевания литых изделий реализуется наиболее вероятный режим неизотермического течения расплава (однофазный или двухфазный режим течения) и наиболее подходящая для конкретной технологии литья схема кристаллизации узко- или широкоинтервального сплава (схема последовательной или объемной кристаллизации).

Для традиционных и разрабатываемых технологий литья характерны неизотермические режимы течения гомогенного или гетерогенного расплава и кристаллизации интервальных сплавов. Чтобы осуществить обоснованный выбор технологии получения отливок и слитков, выполнена системная классификация [17] принципиально разных технологий литья по двум реотермическим признакам: 1 – преобладающий режим течения затвердевающего расплава и 2 – преимущественный характер кристаллизации металлического сплава в ограниченном объеме затвердевающей заготовки.

Чтобы оценить эффективность принципиально разных технологий литья, необходимо выявить реотермические особенности течения затвердевающего расплава в однофазном, двухфазном или смешанном режимах течения по схемам последовательной или объемной кристаллизации интервальных сплавов и совмещенным схемам последовательно-объемной или объемно-последовательной кристаллизации (рисунок).



Реотермическая классификация разных процессов литья по признакам течения расплава и кристаллизации сплава

Затвердевание сплавов

Метод системного анализа [18, 19] облегчает изучение реотермических процессов течения и теплообмена в жидкой сердцевине и в области двухфазного состояния слитков и отливок, что позволяет выявить физико-химические, теплофизические и динамические особенности формирования структурной, физической и химической неоднородности литого металла при затвердевании литых заготовок в неизотермических условиях кристаллизации сплавов.

В процессе затвердевания слитков, отливок, заготовок центробежного и непрерывного литья химическая, физическая и структурная неоднородность их кристаллического строения формируется в условиях нестационарного или квазистационарного теплообмена в системе литая заготовка-литейная оснастка-окружающая среда. В ограниченном объеме слитка или отливки одновременно протекают процессы внутреннего теплообмена между расплавом и коркой затвердевшего металла и внешнего теплообмена между затвердевающей заготовкой, стенками литейной оснастки и окружающей средой.

Саморегулируемый процесс фазового перехода стали, чугуна, бронзы, латуни, силумина и других сплавов из жидкого в твердое состояние протекает в узком или широком интервале температур ликвидус-солидус. В условиях затвердевания слитков, отливок, центробежно- и непрерывнолитых заготовок формируется двухфазная зона кристаллизации сплава [20-22]. Протяженность двухфазной зоны $\Delta\xi_{л-с}$ литых заготовок и продолжительность двухфазного состояния $\Delta t_{л-с}$ интервальных сплавов сильно зависят [23] от градиентов температуры G_T и интенсивностей (скоростей) охлаждения I_T в гетерогенной системе расплав-кристаллы.

По ширине двухфазной зоны (подвижной для слитков и отливок и неподвижной для непрерывнолитых заготовок) градиенты температуры и скорости охлаждения изменяются от максимальных значений в наружных слоях литой заготовки до минимальных значений в ее тепловом центре. При продвижении фронта ликвидус (начало кристаллизации) и фронта солидус (конец кристаллизации) к оси или плоскости симметрии слитка или к тепловому центру отливки протяженность (ширина) двухфазной зоны кристаллизации между фронтами ликвидуса и солидуса сначала монотонно увеличивается до максимального значения, а затем резко уменьшается до нуля. В момент исчезновения двухфазной зоны процесс затвердевания слитка или отливки завершается (кроме жидких включений легкоплавких ликватов).

Комплексный подход к изучению фундаментальных теплофизических закономерностей затвердевания литых заготовок и физико-химических закономерностей кристаллизации интервальных сплавов позволил выявить системные принципы управления реотермическими процессами течения и теплообмена [24, 25] в разных технологиях получения литых изделий высокого качества. Для реализации этих принципов необходимо проводить теоретические и прикладные системные исследования процесса формирования первичной кристаллической структуры литых изделий разной массы, конфигурации и габаритных размеров.

Так как слитки и массивные отливки затвердевают в неравномерном (градиентном) поле температур, то в их жидкой сердцевине возникает самопроизвольное неизотермическое течение кристаллизующегося расплава (естественная тепловая конвекция [20, 26, 27]). При затвердевании толстых литых заготовок тепловая конвекция жидкой стали интенсифицирует образование химической неоднородности литого металла. Для поиска эффективных путей улучшения качества структуры стальных слитков и массивных отливок предложен [28, 29] системный подход к объяснению реотермического механизма формирования Λ -образной ликвации (зональной химической неоднородности литого металла) в процессе затвердевания слитков и крупных отливок с позиций реотермической гипотезы образования ликвационных шнуров в температурно-неоднородном объеме кристаллизующейся стали.

Зона внеосевой Λ -образной ликвации в стальном слитке выявляется [20, 26, 30] на серных отпечатках продольного (осевого) темплета и поперечных темплетов, которые вырезаются на разных горизонтах слитка. К геометрическим, металлогра-

Затвердевание сплавов

фическим и физико-химическим признакам ликвационных шнуров (усов), которые выявляются после химического травления темплетов, вырезанных из стальных слитков и крупных отливок, относятся [28]:

- ширина Λ -образной зоны внецентренной химической неоднородности слитка;
- диаметр протяженных ликвационных шнуров или толщина ликвационных полос;
- длина непрерывных шнуров и прерывистых усов на осевом серном отпечатке;
- расстояние между ликвационными шнурами (или усами) в Λ -зоне слитка;
- углы наклона конусообразного пучка шнуров к оси и к поверхности слитка;
- радиусы кривизны начальных и конечных участков ликвационных шнуров;
- плотность регулярного (упорядоченного) расположения шнуров в Λ -зоне слитка;
- четкость контура шнуров на границе ликвационный шнур-металлическая матрица;
- плотность и микротвердость шнуров (усов) на осевом и поперечном темплетах;
- наличие полосчатости в макроструктуре литого металла поперечных темплетов;
- расположение газовых пор и усадочных дефектов в теле ликвационных шнуров;
- окисленность металла усадочных полостей и газовых пор в ликвационных шнурах;
- тип, дисперсность и морфология неметаллических включений в металле шнуров;
- цвет ликвационных шнуров (усов) на серном отпечатке осевого темплета слитка;
- концентрация ликвирующих элементов в шнурах и в металлической матрице;
- максимальная и минимальная концентрация вредных примесей в Λ -зоне слитка.

Если непрерывный ликвационный шнур не попадает во всю его длину в плоскость осевого сечения стального слитка, то на серном отпечатке, снятом с продольного темплета, проявится только часть шнура. В осевую плоскость слитка могут попасть отдельные участки других ликвационных шнуров. На серном отпечатке продольного (осевого) темплета эти шнуры проявятся в виде коротких ликвационных усов, каждый из которых является частью длинного шнура, расположенного в Λ -зоне химической неоднородности стального слитка.

В соответствии с основной идеей реотермической гипотезы образования ликвационных шнуров [28] в жидкой сердцевине затвердевающего кузнечного, прокатного или трубного стального слитка появляется конусообразный пучок протяженных динамически устойчивых вихревых шнуров. Затем они преобразуются в жидкие каналы, которые затвердевают в теле слитка в виде твердых ликвационных шнуров. Изложим этот механизм следующим образом.

В неизотермических условиях затвердевания слитков и отливок градиенты температуры влияют [13, 27, 28] на взаимосвязанные нестационарные процессы течения и теплообмена в их поперечном и продольном сечениях. По высоте кристаллизующегося ядра стального слитка возникает естественная (тепловая) конвекция [20, 26] температурно-неоднородного расплава. Развитая тепловая конвекция расплава (естественная циркуляция затвердевающей стали) приводит к режиму устойчивого вихревого течения жидкой стали [20, 26, 27] в ограниченном объеме слитка (или массивной отливки) в виде крупномасштабного торообразного вихря, который может распасться по высоте слитка на несколько кольцевых торообразных вихрей.

При охлаждении затвердевающего слитка образованные в режиме тепловой конвекции расплава крупномасштабные вихри [20] торообразной формы, способствующие возникновению в жидкой сердцевине стального слитка мелкомасштабных нитевидных вихрей [18, 28] в виде системы динамически устойчивых вихревых трубок. В градиентном поле сил гравитации длинные вихревые трубки образуют [31] систему гибких вихревых шнуров. Причем, нижние концы вихревых шнуров упираются [28] в боковую поверхность твердо-жидкого каркаса двухфазной зоны кристаллизации стали, а их верхние концы подходят к горизонтальному зеркалу расплава в прибыльной части затвердевающего слитка или отливки большой массы.

В условиях фазового перехода жидкой стали в твердое состояние на обогащенных ликватами участках поверхности твердо-жидкого каркаса, отделяющей двухфазную зону от жидкой сердцевины слитка, могут появиться вихревые воронки. При усадке дендритного каркаса двухфазной зоны в эти воронки затягивается расплав с ликвирующими примесями. Вихревые воронки являются дискретными очагами

Затвердевание сплавов

зарождения в объеме жидкой стали вихревых трубок в виде гибких вихревых шнуров. Устойчивость вихревых шнуров в жидкой сердцевине стального слитка поддерживают центробежные силы, которые вытесняют примеси из окружающего их матричного расплава слитка в объем каждого вихревого шнура.

При продвижении фронтов ликвидуса и солидуса двухфазной зоны кристаллизации к оси кузнечного слитка спокойной стали или к плоскости симметрии прокатного слитка кипящей или спокойной стали затвердевающий металл слитка захватывает обогащенные ликватами вихревые шнуры и фиксирует их в литом металле в виде конусообразного пучка жидких ликвационных каналов [11, 28], в которых находится концентрационно переохлажденный расплав, обогащенный ликвирующими элементами и примесями (С, S, Р и др.).

При затвердевании стального слитка жидкие ликвационные каналы затормаживают рост дендритов в матричном расплаве, так как загрязненная легкоплавкими примесями жидкая фаза ликвационных каналов растворяет или оплавляет кончики ветвей растущих дендритов. Поэтому со стороны поверхности охлаждения слитка стенки ликвационных шнуров гладкие.

В затвердевающем расплаве слитка за каждым ликвационным каналом с обогащенной ликватами жидкой фазой зарождаются и растут новые кристаллы. Поэтому со стороны оси стального слитка стенки образующихся ликвационных шнуров шероховатые (размытые). После трансформации вихревых шнуров с высокой концентрацией легкоплавких примесей в жидкие ликвационные каналы и их затвердевания в матричном металле стального слитка образуется Λ -зона внеосевой химической неоднородности (зона макроликвации).

Итак, согласно реотермической гипотезе ликвационные шнуры образуются в процессе затвердевания стального слитка в следующей последовательности. Сначала в неравномерном температурном поле кристаллизующейся стали возникает естественная тепловая конвекция неизотермического расплава, которая реализуется в виде крупномасштабного вихревого течения жидкой фазы в ограниченном объеме затвердевающего слитка. Под действием свободной конвекции расплава и усадки твердой фазы на границе сопряжения жидкой сердцевины слитка с дендритным каркасом двухфазной зоны могут появляться вихревые воронки. Некоторые из них образуют протяженные вихревые трубки, которые реализуются в виде мелкомасштабных вихревых шнуров. В нераспавшиеся (устойчивые) вихревые шнуры под действием центростремительных сил диффундируют растворенные в жидкой стали газы, ликвирующие элементы (углерод и др.) и вредные примеси (сера, фосфор и др.), которые располагаются вдоль оси вихревого шнура. В объеме устойчивых вихревых шнуров резко увеличивается концентрация легкоплавких ликватов. Затем протяженные вихревые шнуры трансформируются в жидкие ликвационные каналы, в полости которых на заключительной стадии затвердевания обогащенная легкоплавкими ликватами сталь кристаллизуется в виде твердых ликвационных шнуров внеосевой химической неоднородности слитка.

На серных отпечатках осевых темплетов стального слитка, ликвационные шнуры с высоким содержанием серы после химического травления темплета реактивом Баумана имеют темный цвет [20, 30]. Если слиток получен из чистой стали [32] с низким содержанием ликвирующей примеси – серы, то ликвационные шнуры на серном отпечатке продольного темплета проявляются в виде светлых полос (белые шнуры) с более высоким содержанием ликвирующего элемента – углерода, по сравнению с матричным металлом слитка.

В процессе затвердевания стального слитка в изложнице вредное влияние естественной тепловой конвекции неизотермического расплава на первичную структуру литого металла целесообразно значительно ослабить [33, 34] за счет подавления естественно-конвективного течения жидкой стали в кристаллизующемся ядре слитка или массивной отливки.

Вероятный реотермический механизм формирования зоны внецентренной (внеосевой) химической неоднородности литого металла при затвердевании кузнечных, прокатных и трубных стальных слитков, толстых непрерывнолитых заготовок

и крупных отливок следует учитывать при развитии теории высокотемпературных процессов в жидкой сердцевине и двухфазной зоне кристаллизации [35-39] для повышения качества литых изделий.

На термовременные условия образования первичной структуры литого металла, которая формируется в двухфазной зоне стальных слитков и крупных отливок, влияют термически сопряженные процессы массо- и теплопереноса в кристаллизующемся ядре литых заготовок. Системный анализ реотермических процессов течения и теплообмена в гетерогенном расплаве позволил выявить эффективные литейно-металлургические принципы уменьшения внеосевой и осевой химической неоднородности [40] затвердевающих слитков и массивных отливок для улучшения качества структуры литого и деформированного металла.

В жидко-твердой части двухфазной зоны затвердевания стальных слитков, массивных отливок, заготовок непрерывного и центробежного литья под действием гравитационных или центробежных (инерционных) сил тяжести происходит расслоение неизотермической суспензии расплав-кристаллы. Реотермический эффект расслоения [25] жидко-твердой части двухфазной зоны кристаллизации может привести к осаждению (седиментации) на фронт затвердевания более плотной, чем расплав, дискретной твердой фазы, которая состоит из изолированных кристаллов, обломков ветвей дендритов и хорошо смачиваемых жидкой сталью неметаллических включений. На зеркало расплава всплывают образующиеся газовые пузырьки, что способствует флотации плохо смачиваемых жидкой сталью неметаллических включений. Мелкие включения прилипают к поверхности всплывающих в жидком металле газовых пузырей и вместе с ними перемещаются в верхние объемы слитка кипящей стали, в прибыльную часть слитка спокойной стали, в прибыль массивной стальной отливки или на свободную поверхность непрерывнолитой или центробежнолитой заготовки.

В твердо-жидкой части двухфазной зоны литых заготовок разной массы и геометрии (стальные слитки, отливки, заготовки центробежного и непрерывного литья) возникают напряжения усадки и термические напряжения. Напряжения усадки возникают в интервале температур ликвидус-солидус при фазовом переходе жидкое-твердое с образованием зерен аустенита в условиях первичной кристаллизации стали [25]. При структурных превращениях литого металла слитка в температурном интервале вторичной кристаллизации стали [41] между критическими точками A_{γ_3} и A_{γ_1} диаграммы состояния системы железо-углерод тоже возникают напряжения усадки, так как зерна аустенита трансформируются в зерна перлита и феррита с изменением их объема. Неравномерное распределение температуры по сечению затвердевающих заготовок приводит к возникновению термических напряжений. При формировании стальных слитков и отливок в обогащенном ликватами дендритном каркасе двухфазной зоны может проявиться реотермический эффект разрушения [25] твердо-жидкой части двухфазной зоны с образованием в литом металле кристаллизационных трещин.

Регулируя мощность перемешивания перегретого над температурой ликвидуса расплава и контролируя степень захолаживания кристаллизующегося ядра затвердевающих слитков и отливок, можно эффективно управлять [24, 25] неизотермическим процессом формирования структуры литых заготовок разной массы и геометрии. Реотермические процессы течения и теплообмена в двухфазной зоне кристаллизации существенно влияют на разветвленность дендритных кристаллов, протяженность и толщину ветвей первого порядка, расстояние между ветвями второго порядка и другие параметры дендритной структуры литого металла.

Чтобы повысить однородность кристаллической структуры литого металла, которая формируется в двухфазной зоне первичной кристаллизации при затвердевании стальных слитков, массивных отливок, центробежно- и непрерывнолитых заготовок, необходимо [40] уменьшить градиенты температуры на подвижном фронте затвердевания литых заготовок и увеличить интенсивность (скорость) охлаждения кристаллизующегося расплава.

Для научно обоснованного выбора эффективных способов улучшения качества

литой структуры металлоизделий и гарантированного повышения прочностных, пластических и эксплуатационных свойств литого металла требуется разрабатывать рациональные схемы конструктивно-технологической реализации процессов затвердевания отливок, слитков, центробежно- и непрерывнолитых заготовок и кристаллизации интервальных сплавов.

Поиск наиболее эффективных совмещенных схем повышения качества структуры внутренних и поверхностных слоев литого металла базируется на результатах системного анализа взаимосвязанных динамических, физико-химических и теплофизических процессов затвердевания и кристаллизации [42-44]. С целью повышения физико-механических свойств литого металла и функциональных свойств литых изделий необходимо разрабатывать реотермическую теорию управления качеством литой структуры, с помощью которой можно облегчить создание новых литейно-металлургических технологий гетеролитья [24, 28, 44].



Список литературы

1. Ефимов В. А., Эльдарханов А. С. Технологии современной металлургии. – М.: Новые технологии, 2004. – 784 с.
2. Скобло С. Я., Казачков Е. А. Слитки для крупных поковок. – М.: Металлургия, 1973. – 247 с.
3. Марченко И. К., Бровман М. Я. Производство крупных стальных слитков. – М.: Металлургия, 1980. – 239 с.
4. Мостовой А. Б., Выгоднер Л. Ф., Каменский Л. А. Новые технологические процессы получения качественных кузнечных слитков. – М.: Металлургия, 1983. – 111 с.
5. Основи металургійного виробництва металів і сплавів // Д. Ф. Чернега, В. С. Богушевський, Ю. Я. Готвянський та ін. – Київ.: Вища школа, 2006. – 503 с.
6. Вейник А. И. Теплообмен между слитком и изложницей. – М.: Металлургиздат, 1959. – 357 с.
7. Непрерывная разливка стали / А. Н. Смирнов, С. В. Куберский, Е. В. Штепан // Донецк: ДонНТУ, 2011. – 482 с.
8. Затуловский С. С. Суспензионная разливка. – Киев.: Наукова думка, 1981. – 259 с.
9. Твердження сталевих зливок в виливниці: Довідник / О. В. Дубина, В. Й. Тимошпольський, Ю. А. Самойлович та ін. – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2004. – 311 с.
10. Затвердевание металлов и металлических композиций / В. А. Лейбензон, В. Л. Пилюшенко, В. М. Кондратенко и др. – Киев.: Наукова думка, 2009. – 410 с.
11. Флемингс М. Процессы затвердевания. – М.: Мир, 1977. – 423 с.
12. Шмрга Л. Затвердевание и кристаллизация стальных слитков. – М.: Металлургия, 1985. – 248 с.
13. Вайнгард У. Введение в физику кристаллизации металлов. – М.: Мир, 1967. – 160 с.
14. Баландин Г. Ф. Формирование кристаллического строения отливок. – М.: Машиностроение, 1973. – 287 с.
15. Гуляев Б. Б. Затвердевание и неоднородность стали. – Л. – М.: Металлургиздат, 1950. – 227 с.
16. Хворинин Н. Кристаллизация и неоднородность стали. – М.: Машгиз, 1958. – 392 с.
17. Мамишев В. А. Реотермическая классификация технологических процессов литья // Тез. Литейн. производство: высококачественные отливки на основе эффективных технологий. – Киев: ФТИМС НАН Украины, 2004. – С. 89-91.
18. Самойлович Ю. А. Системный анализ кристаллизации слитка. – Киев.: Наукова думка. – 1983. – 248 с.
19. О реодинамических и термокинетических предпосылках разработки физико-математических моделей оптимального управления качеством литых изделий / В. А. Мамишев, В. А. Ефимов, В. П. Осипов и др. // Повышение качества продукции литейного производства. – Киев: ИПЛ АН УССР, 1978. – С. 93-97.
20. Ефимов В. А. Разливка и кристаллизация стали. – М.: Металлургия, 1976. – 539 с.
21. Борисов В. Т. Теория двухфазной зоны металлического слитка. – М.: Металлургия, 1987. – 224 с.
22. Журавлев В. А., Китаев Е. М. Теплофизика формирования непрерывного слитка. М.: Металлургия, 1974. – 215 с.

Затвердевание сплавов

23. *Мамишев В. А.* Особенности формирования двухфазной зоны отливок и слитков с позиций системного анализа // Экономический путь к высококачественному литью. – Киев: ФТИМС НАН Украины, 2005. – С. 34-36.
24. *Мамишев В. А.* Системный анализ затвердевания литых заготовок с переменной кривизной границ двухфазной зоны // Процессы литья. – 2014. – № 1. – С. 19-26.
25. *Мамишев В. А.* Реотермическая концепция управления кристаллическим строением литых изделий // Процессы литья. – 2004. – № 3. – С. 43-48.
26. *Скребцов А. М.* Конвекция и кристаллизация металлического расплава в слитках и отливках. – М.: Metallurgia, 1993. – 143 с.
27. *Недопекин Ф. В., Огурцов А. П., Белоусов В. В.* Математическое моделирование процессов переноса в слитках и отливках с учетом внешних воздействий. – Днепропетровск: ДГТУ, 1997. – 199 с.
28. *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.
29. О применении критериев оптимальности двухфазной зоны к анализу условий образования и подавления внецентренной ликвации / В. А. Мамишев, В. П. Осипов, Ю. Я. Скок, и др. // Влияние внешних воздействий на жидкий и кристаллизующийся металл. – Киев: ИПЛ АН УССР, 1983. – С. 132-135.
30. Крупный слиток / А. Н. Смирнов, С. Л. Макуров, В. М. Сафонов, А. Ю. Цупрун. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 279 с.
31. *Повх И. Л.* Техническая гидромеханика. – Л.: Машиностроение, 1976. – 503 с.
32. *Баум Б. А., Хасин Г. А., Тягунов Г. В.* Чистая сталь. – М.: Metallurgia, 1984. – 208 с.
33. О применимости термического критерия качества литья для определения ширины зоны шнуровой ликвации / В. А. Мамишев, Ю. Я. Скок, Л. А. Соколовская и др. // Совершенствование процессов непрерывной разливки стали. – Киев: ИПЛ АН УССР, 1985. – С. 35-37.
34. *Мамишев В. А., Шинский О. И., Соколовская Л. А.* Системный анализ механизмов влияния конвекции расплава и литейной оснастки на структуру стальных заготовок // Современные материалы и технологии в металлургии и машиностроении. – Киев: ФТИМС НАН Украины. – 2007. – С. 136-138.
35. *Мамишев В. А.* Особенности теплопереноса при формировании литых изделий с изменяющейся кривизной фронтов затвердевания // Процессы литья, 1998. – № 3-4. – С. 63-67.
36. *Мамишев В. А., Соколовская Л. А.* О теоретической зависимости скоростей затвердевания слитков различной конфигурации от кривизны их профиля и темпа кристаллизации стали // Разливка кипящей стали. – Киев: ИПЛ АН УССР, 1984. – С. 26-30.
37. *Мамишев В. А.* О математической интерпретации терморееоники процессов литья // Новое в процессах литья. – Киев: ИПЛ АН УССР, 1974. – С. 84-87.
38. О физико-математическом обосновании реотермического критерия оптимального управления зоной двухфазного состояния / В. А. Мамишев, В. А. Ефимов, В. П. Осипов и др. // Теплофизика стального слитка. – Киев: ИПЛ АН УССР, 1980. – С. 94-98.
39. *Мамишев В. А.* Математические аспекты реотермической теории управления качеством структуры слитков и отливок // Современные материалы и технологии в металлургии и машиностроении. – Киев: ФТИМС НАН Украины, 2007. – С. 139-141.
40. *Мамишев В. А.* О реотермических условиях гетеролитья, стабилизирующих качество макроструктуры литого и деформированного металла // Процессы разливки, модифицирования и кристаллизации металлов и сплавов. – Ч. 1. – Волгоград: Дом науки и техники, 1990. – С. 125-128.
41. *Гуляев А. П.* Металловедение. – М.: Metallurgia, 1978. – 647 с.
42. *Мамишев В. А.* Улучшение качества отливок и слитков с позиций системного анализа // Литейное производство в новом веке – как победить в конкуренции. – Киев: ФТИМС НАН Украины, 2002. – С. 31-34.
43. *Мамишев В. А.* Системное исследование многофакторных процессов формирования литых изделий // Нові матеріали і технології в машинобудуванні. – Київ: НТУ КПІ, – 2013. – С. 81-82.
44. *Мамишев В. А.* Системний аналіз реотермічних особливостей процесу гетеролиття // Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра [Електрон. ресурс]. – Київ: НТУ КПІ, 2013. – С. 356-359.

Поступила 27.11.2014