

— восстановление железа из окислов на поверхности канала стакана алюминием, поступающим из струи металла;

— избирательная кристаллизация стали на восстановленных кристаллах железа, как на центрах кристаллизации, приводящая к образованию сплошной настыли на поверхности канала стакана, обогащенной неметаллическими включениями, алюминием и кремнием.

Следовательно, результатом взаимодействия жидкого металла с разливыми стаканами является пропитка огнеупора в зоне канала окислами железа, марганца, кремния и алюминия. Накопление и смывание окислов с поверхности канала разливочного стакана при разливке происходит непрерывно. В случае образования легкоплавких соединений на границе металл-огнеупор будет происходить размывание стаканов, при образовании тугоплавких — затягивание.

Полное отсутствие разъедания или затягивания возможно при равновесии между скоростью зарождения и прилипания окисленных компонентов стали к поверхности канала стакана и их смывания. Процессу способствуют концентрация кислорода в металле к моменту прохождения его через стакан, наличие неметаллических включений с основой из тугоплавких окислов (например,  $Al_2O_3$ ) и концентрация растворенного алюминия в стали.

©Шевченко В.П., Самборский М.В., 1999.

## ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА ПРИ ВИБРОИМПУЛЬСНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ЗАТВЕРДЕВАЮЩИЕ СЛИТКИ И ОТЛИВКИ

СМИРНОВ А.Н. (ДОНГТУ), РЕДЬКО Г.Л. (ДОНГТУ)

*На основе физического и математического моделирования исследованы гидродинамические, тепловые и кристаллизационные процессы, которые сопровождают затвердевание стальных слитков в условиях наложения виброимпульсного воздействия на жидкую фазу.*

В процессе производства промышленных отливок и слитков для подавления и предотвращения дефектов, кристаллизационного, усадочного и ликвиационного характера все большее распространение получают специальные технические приемы, которые позволяют управлять качеством металла непосредственно в процессе затвердевания. В их основе обычно используется принцип принудительного физического воздействия на жидкую фазу в ходе затвердевания посредством наложения внешнего виброимпульсного воздействия. Обобщая имеющиеся в литературе данные, относящиеся к результатам виброимпульсной обработки [1–3], следует отметить, что достижение максимального положительного эффекта обычно связывается с энергетическими показателями и характером принудительного перемешивания жидкой фазы, предпочтительным направлением движения принудительных конвективных потоков, предельной скоростью их движения, местом приложения воздействия и способом подвода энергии.

К числу физических эффектов, возникновение которых обуславливается наложением виброимпульсного воздействия, можно отнести: явление подавления потоков термогравитационной и развития вынужденной конвекции; развитие волновых процессов на поверхности и в объеме расплава; явление кавитации в объеме жидкой

фазы; зарождение и дробление частиц твердой фазы в расплаве, и их рост в переохлажденном расплаве.

Экспериментальная часть работы выполнена на опытной установке, которая состояла из следующих основных элементов: плоская изложница, боковые стенки которой представляют собой медные водоохлаждаемые элементы, а передняя и задняя стенки выполнены из прозрачной пластмассы с низкой теплопроводностью; аппаратура для пульсационного воздействия на жидкую фазу слитка; термометры для фиксирования температуры охлаждающей жидкости на входе и выходе из кристаллизатора; термопары для фиксирования температуры в различных зонах слитка. При выборе рабочего (моделирующего) вещества руководствовались необходимостью визуализации процесса формирования слитка в течение всего периода затвердевания. В значительной степени этим условиям удовлетворяет тиосульфат натрия ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ), который имеет низкую температуру плавления, обеспечивает подобие процессов тепло- и массопереноса при затвердевании и в расплавленном состоянии является оптически прозрачным веществом. Выбор геометрического масштаба осуществлялся исходя из теплофизических характеристик тиосульфата натрия, и стали с соблюдением критериев подобия Фурье ( $Fo$ ), гомохронности ( $Ho$ ) и произведения критериев Био ( $Bi$ ) и фазового перехода ( $N$ ) —  $Bi \cdot N$ .

Влияние виброимпульсного воздействия на конвективную устойчивость потоков сопровождается следующими эффектами: а) стабилизация термоконвекционных течений; б) разрушение термогравитационных потоков вплоть до их полного подавления; в) формирование новых конвективных потоков, как во всем объеме жидкой фазы, так и локализация принудительного перемешивания в отдельных объемах жидкой ванны. При этом максимальная интенсивность перемешивания наблюдается либо у поверхности расплава (при наложении вибрации на расплав вместе с емкостью), либо в зоне, непосредственно прилегающей к источнику вибрации. В противоположность вибрационному воздействию, пульсационное перемешивание обеспечивает формирование области вихревой турбулентности, в зоне распространения вытесняемой из погружаемой трубы струи и направленных восходящих конвективных потоков по периферии (обычно вдоль фронта кристаллизации).

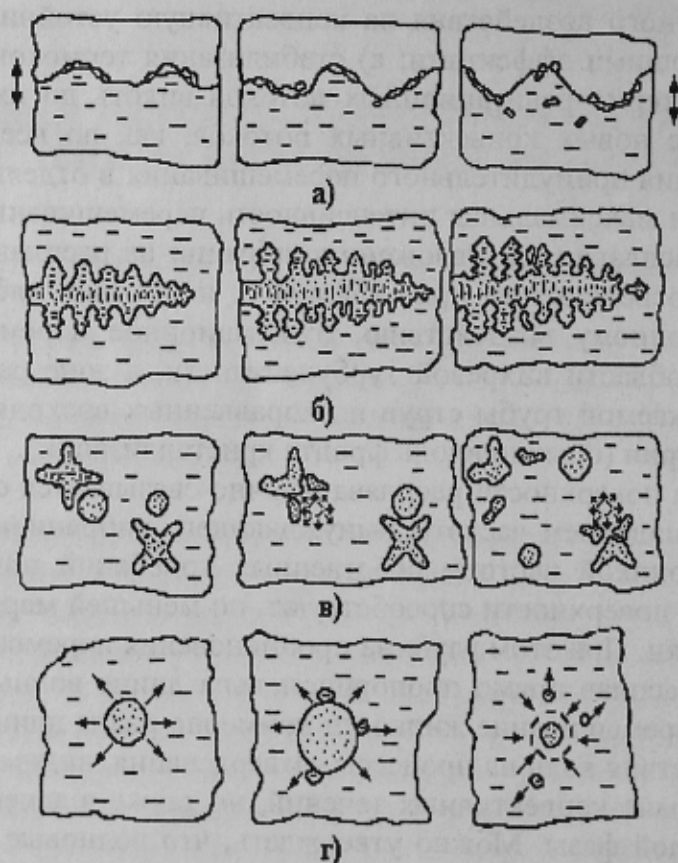
Возникновение волн на поверхности расплава обычно связывается с проявлением эффекта резонанса: совпадением частоты вынуждающего вибрационного воздействия с какой-либо гармоникой частоты собственных колебаний поверхности жидкости в сосуде. Волны на поверхности способствуют, по меньшей мере, перемешиванию жидкой фазы отливки. При этом глубина проникновения перемешивающего эффекта стоячих волн в расплав прямо пропорциональна длине волны (обычно высота слоя вовлекаемой в перемешивание жидкости примерно равна длине стоячей волны). Суть эффекта воздействия волн на процессы затвердевания, видимо, следует рассматривать не только в плане конвективных течений, но также в аспекте разрушения формирующейся твердой фазы. Можно утверждать, что волновые процессы способствуют разрушению твердой корочки на поверхности расплава и разрушению вторичных и третичных ветвей дендритов в зоне жидко-твердой фазы.

С явлением развития эффекта кавитации в расплаве ряд исследователей связывает достижение конкретных положительных эффектов, базирующихся на резком увеличении числа частиц твердой фазы в расплаве (измельчение кристаллической структуры, дегазация, повышение плотности, а также пластических свойств вязкости и пр.) при виброимпульсной обработке. Процесс возникновения и развития явлений кавитации зависит от состояния жидкости, включая ее вязкость и наличие в ней твердых или газообразных примесей, а также от поля давления в зоне кавитации.

Параметры колебаний, обеспечивающих начало и развитие кавитационных явлений, в первом приближении можно оценить из условия достижения пиковыми значениями давления жидкости в поле вибрационных сил величин, приближающихся к нулю [1]. По всей вероятности, определение показателей кавитационной прочности и кавитационного порога для промышленных слитков и отливок следует осуществлять только комбинированным методом, используя теоретические зависимости с соответствующей их корректировкой в ходе лабораторных и промышленных экспериментов в привязке к конкретным условиям и методам воздействия.

В целом при виброимпульсном воздействии в условиях развития кавитации создаются благоприятные условия для дробления частиц твердой фазы в ходе обработки. Дополнительные частицы твердой фазы в расплаве могут образовываться благодаря следующим, динамически развивающимся сопряженным процессам (рисунок 1): механическому разрушению твердой корочки на поверхности расплава при развитии волновых процессов; разрушению вторичных и третичных ветвей дендритов на фронте кристаллизации под действием конвективных потоков и ударных нагрузок; кавитационному разрушению частиц твердой фазы при схлопывании пузырьков (эффект удара давления).

Рост свободных частиц в расплаве возможен только в том случае, когда температура поверхности



**Рисунок 1** - Схематическое представление основных механизмов образования частиц твердой фазы в расплаве при виброимпульсном воздействии: *а* — развитие волн на поверхности расплава; *б* — разрушение вторичных и третичных ветвей дендритов; *в, г* — при развитии эффекта кавитации.

поверхности частицы выше, чем температура расплава, а выделенная теплота затвердевания может быть отведена в расплав [4–5]. Практические данные по количественным оценкам характера роста частиц твердой фазы в железоуглеродистых расплавах в литературе отсутствуют. Вместе с тем, общие оценки особенностей затвердевания такой частицы могут быть выполнены расчетным путем при принятии определенных допущений. В целом для железоуглеродистых сплавов показано, что величина радиуса частицы (сферической формы) существенно зависит от величины переохлаждения расплава и крайне незначительно от концентрации углерода. Этот вывод следует связывать с тем фактом, что высокая начальная скорость

затвердевания обеспечивает быстрый рост радиуса частицы. Между тем, скорость последующего роста радиуса шара существенно замедляется. С практической же точки зрения наибольший интерес представляет перекрытие температурных полей рядом расположенных частиц, так как в этом случае создаются предпосылки для локального относительного подогрева расплава в жидкой ванне.

Для исследования температурного поля, создаваемого двумя растущими в расплаве свободными частицами одного радиуса, рассматривался небольшой объем окружающего эти частицы расплава. Были приняты следующие допущения: ввиду малых размеров исследуемой области физические свойства расплава можно считать одинаковыми для всех точек рассматриваемого объема; конвективными потоками внутри исследуемой области можно пренебречь; температурное поле стационарно; внутри области отсутствуют источники и стоки тепла; форма поверхности частиц аппроксимируется сферой. С учетом перечисленных предположений математическая модель для исследования процессов теплообмена включает в себя стационарное уравнение теплопроводности без конвективного и источникового слагаемых в полярных координатах:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial a^2} = 0, \quad (1)$$

где  $r$ ,  $a$  — полярные координаты,  $T$  — температура расплава.

Граничные условия для рассматриваемой задачи определены в следующем виде: при  $r=R$  ( $R$  — внешний радиус частицы) значение  $T=T_p$  ( $T_p$  — температура поверхности частицы); при  $r \rightarrow \infty$  значение  $T=T_\infty$ . Для численного решения уравнения (1) использован метод последовательных смещений. Обобщая полученные расчетные данные, можно принять, что эффект перекрытия тепловых пограничных слоев, растущих в переохлажденном расплаве частиц, наблюдается при их расположении друг относительно друга на расстоянии 10–20 радиусов. Это соответствует удельной концентрации твердой фазы в расплаве на уровне 0,1–1%, а предпочтительным является наличие в расплаве частиц малого радиуса (0,1–0,3 мм), рост которых происходит значительно быстрее.

Сравнительная оценка влияния рассмотренных выше физических эффектов выполнена применительно к методу пульсационного воздействия, заключающегося в перемешивании жидкой фазы пульсирующей затопленной струей, формируемой посредством периодического изменения давления газа во внутренней полости погруженной в прибыль керамической трубы. По существу при пульсационной обработке следует ожидать как заметного принудительного перемешивания жидкой ванны, так и развития кавитационных эффектов.

Численные сравнительные оценки различных сторон процессов, сопровождающих формирование слитка в условиях наложения пульсационного воздействия выполнены с помощью математической модели, которая была сформулирована на базе уравнений движения несжимаемой вязкой жидкости (Навье-Стокса), неразрывности и теплопереноса. Расчет доли твердой фазы осуществлялся по правилу неравновесного рычага. Для скорости движения расплава заданы граничные условия непроницаемости и прилипания на твердых поверхностях, симметрии — на оси слитка. В выходном сечении пульсационной трубы использовалось условие периодического изменения скорости, полученное в результате физического моделирования:

$$V_m = V_0 \left( -1 + \sum_{k=1}^5 \frac{\sin(k\omega t)}{k} \right), \quad (2)$$

где  $V_0$  — амплитуда, м,  $\omega$  — частота воздействия, Гц.

Скорость на свободной поверхности расплава определялась из условия равенства расхода. Граничные условия для температуры отражают отсутствие потока тепла на оси слитка, сопряжение на границах расплав — твердая фаза и металл — изложница (в предположении идеального контакта) и внешний теплообмен на границе контакта изложницы с окружающей средой.

Для численного решения поставленной задачи использовался двухполевой метод, а в математической формулировке модели осуществляется переход к переменным вихрь ( $\omega$ ) и функция тока ( $\psi$ ), а используемые уравнения преобразуются к виду:

$$\frac{\partial \omega}{\partial Fo} + \frac{\partial (u\omega)}{\partial x} + \frac{\partial (v\omega)}{\partial y} = Pr \left[ \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right] + Pr^2 Gr \frac{\partial \theta}{\partial x}; \quad (3)$$

$$\omega = - \left( \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} \right); \quad (4)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial Fo} + \frac{\partial (u\theta)}{\partial x} + \frac{\partial (v\theta)}{\partial y} = \left[ \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right]; \quad (5)$$

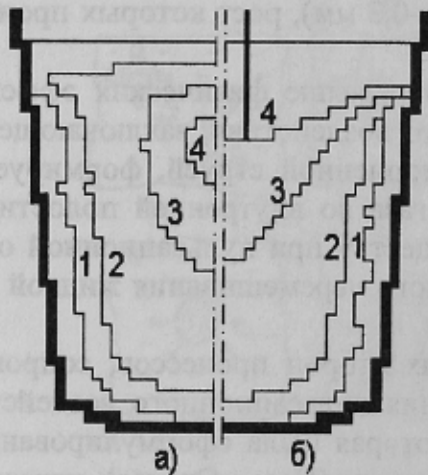
где  $u = \partial \psi / \partial y$ ,  $v = -\partial \psi / \partial x$  — компоненты скорости,  $\theta$  — безразмерная температура,  $Fo$ ,  $Pr$ ,  $Gr$  — критерии Фурье, Прандтля и Грасгофа.

Конечно-разностная аппроксимация уравнений (3)–(5) и граничных условий осуществлялась с помощью интегро-интерполяционной процедуры и метода переменных направлений. Полученные линейные уравнения решались на ЭВМ методом трехдиагональной матрицы. Особенностью решения системы (3)–(5) является наличие больших локальных градиентов скорости, что накладывает жесткие ограничения

на величину временного шага, нарушение которых приводит к неустойчивости разностной схемы.

Разработанная математическая модель позволяет рассчитывать величину и направление движения жидкости, а также температуру для любой точки заданного объема в течение всего периода обработки и затвердевания. Точность полученных результатов оценивалась путем их сравнения с данными физического моделирования. Установлено, что математическая модель обеспечивает адекватный перенос всех наблюдаемых на физической модели эффектов в части гидродинамики и теплопереноса. При этом сходимость расчетных и экспериментальных значений полностью укладывалась в доверительный интервал измерений, и их расхождение не превышало 8–10%.

Подтверждено, что при наложении



**Рисунок 2** - Расчетные фронты кристаллизации сравнительного (а) и опытного (б) слитков для моментов времени: 1 — 5 мин; 2 — 20 мин; 3 — 40 мин; 4 — 60 мин.

пульсационного воздействия происходит кардинальное изменение характера движения потоков расплава в жидкой ванне, заключающееся в формировании зоны вихревых турбулентных течений в области прямого распространения пульсирующей струи и формировании направленных конвективных потоков, восходящих вдоль фронта затвердевания по периферии жидкой ванны. Степень развития вышеперечисленных зон и явлений во многом зависит от места приложения и интенсивности вынуждающих пульсаций.

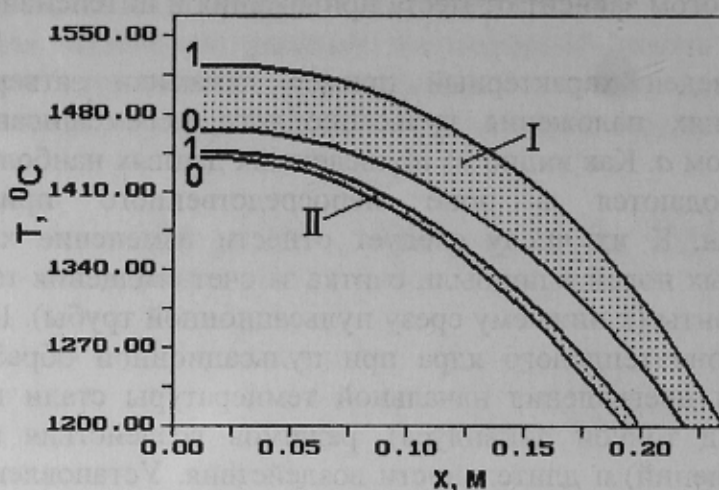
На рисунке 2 приведен характерный пример динамики затвердевания стального слитка в условиях наложения пульсационного перемешивания *б* в сравнении с обычным слитком *а*. Как видно из приведенных данных наиболее существенные отличия наблюдаются в зоне непосредственного приложения пульсационного воздействия. К их числу следует отнести изменение характера распределения температурных полей в прибыли слитка за счет смещения теплового ядра в более высокие горизонты (к нижнему срезу пульсационной трубы). При этом расчетная температура в зоне теплового ядра при пульсационной обработке во многом зависит от степени превышения начальной температуры стали в слитке (температуры перегрева над точкой ликвидуса), режимов воздействия (в части развития кавитационных явлений) и длительности воздействия. Установлено, что в начальные 10–15% периода затвердевания температура в зоне теплового ядра примерно соответствует температуре металла в момент окончания заливки. При этом в отсутствие кавитационных явлений (дробления и лавинного нарастания количества частиц твердой фазы) такая картина сохраняется до 60–70% периода затвердевания, а теплое ядро носит ярко выраженный характер и располагается строго у нижнего среза пульсационной трубы. При проведении пульсационной обработки, сопровождающейся кавитационными явлениями и дроблением частиц твердой фазы в расплаве, происходит быстрое снятие перегрева металла в жидкой ванне, а границы теплового ядра становятся более размытыми.

Вместе с тем эффект смещения теплового ядра к нижнему срезу пульсационной трубы сохраняется и поддерживается в течение всего времени обработки. В конечном счете, такая обработка способствует улучшению условий тепловой работы прибыли в целом. Это достаточно убедительно подтверждается тем фактом, что продвижение фронта затвердевания в прибыль при наложении пульсационного воздействия существенно замедляется (рисунок 3). Следует дополнительно отметить, что эффект деформации температурного поля при пульсационном воздействии носит в целом достаточно локальный характер и практически не проявляется в средних и нижних сечениях слитка.

Результаты проведенных расчетов достаточно хорошо корреспондируются с экспериментальными данными, полученными на крупных кузнечных слитках [6], в части перемещения в верхние горизонты прибыли усадочной раковины и смещения в тело слитка шнуров внецентренной ликвации. Например, для слитка массой 36 т отмечено уменьшение глубины проникновения усадочной раковины на 250–300 мм, а шнуры внецентренной ликвации полностью отсутствовали в зоне, затвердевшей непосредственно в ходе пульсационного перемешивания.

Можно утверждать, что ликвидирующие элементы выносились в прибыльную часть слитка восходящими конвективными потоками, формируемыми в ходе обработки. При этом зона подсадочной положительной ликвации в опытном слитке располагалась непосредственно у нижнего среза погружаемой трубы и соответствовала расчетному положению теплового ядра в прибыли слитка.

Таким образом, наложение на затвердевающий расплав виброимпульсных воздействий сопровождается развитием определенной совокупности физических явлений, которые при соответствующих условиях могут самым серьезным образом изменить условия затвердевания слитка или отливки. По мнению авторов, для повышения



**Рисунок 3** - Динамика продвижения фронта затвердевания в прибыльной части слитка в условиях естественной конвекции (0) и пульсационного воздействия (I).

эффективности практического применения виброимпульсной обработки необходимо всестороннее изучение взаимосвязи вышеупомянутых эффектов с конечными качественными показателями процессов затвердевания. Вероятно, в этом случае могут быть сформулированы основные положения, корректирующие изменение условий затвердевания в сравнении с традиционными представлениями, что позволит решить

проблему оптимизации параметров виброимпульсного воздействия в зависимости от конкретных промышленных объектов. Соответственно виброимпульсное воздействие при затвердевании можно рассматривать как объективный фактор управления тепловым режимом затвердевания и качеством отливок на базе эффектов генерирования и роста частиц твердой фазы в расплаве в совокупности с принудительным регламентированным перемешиванием жидкой фазы.

### Список литературы

1. Campbell J. Effects of Vibration During Solidification// International Metals Reviews. 1981. No 2. — P.71–107.
2. Ефимов В.А., Эльдарханов А.С. Физические методы воздействия на процессы затвердевания сплавов. — М.: Металлургия: 1995. — 272 с.
3. Воздействие мощного ультразвука на межфазную поверхность металлов/ О.В.Абрамов, В.И.Добаткин, В.Ф.Казанцев и др. — М.: Наука, 1986. — 278 с.
4. Иванцов Г.П. Температурное поле вокруг шарообразного, цилиндрического и иглообразного кристалла, растущего в переохлажденном расплаве// Доклады АН СССР. 1947. Т.58. — С.567–569.
5. Trivedi R. Growth of Dendritic Needles from Supercooled Melt// Acta Metallurgica. 1970. V.18. No 3. — P.267–296.
6. Исследование особенностей затвердевания слитка при пульсационном перемешивании жидкой ванны/ В.Л. Пилушенко, А.Н. Смирнов, С.В. Пильгук, И.А. Орлов// Процессы литья. 1994. № 2. — С.20–27.

© Смирнов А.Н., Редько Г.Л., 1999.