

### АНАЛИЗ СПОСОБОВ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ЖИДКОГО ЯДРА ЗАТВЕРДЕВАЮЩЕЙ ОТЛИВКИ

*В статье рассмотрены основы теории перемешивания и дан анализ влияния вида мощности перемешивания на интенсивность движения жидкого ядра отливки. Для улучшения качества литых изделий предложены и апробированы на физической модели способы прерывистого и реверсивного вынужденного перемешивания кристаллизующегося металла.*

**Ключевые слова:** кинетическая энергия, мощность, перемешивание жидкого ядра, затвердевающая отливка.

*Жук В. И. Аналіз способів перемішування рідкого ядра відливки, що твердіє. У статті розглянуто основи теорії перемішування та виконано аналіз впливу виду потужності перемішування на інтенсивність руху рідкого ядра відливки. Для покращання якості литих виробів запропоновані і апробовані на фізичній моделі способи переривистого і реверсивного вимушеного перемішування металу, що кристалізується.*

**Ключові слова:** кінетична енергія, потужність, перемішування рідкого ядра, відливка, що твердіє.

*V. I. Zhuk. The analysis of the ways of liquid kernel interfusion of a solidifying ingot. The article describes the basis of mixing theory and the analysis of influence of type of interfusion power on intensity of motion of liquid kernel of a solidifying ingot. Methods of interrupted and reversible forced interfusions were offered for the improvement of quality of castings.*

**Keywords:** kinetic energy, power, interfusion of liquid part, a solidifying casting.

**Постановка проблемы.** В настоящее время в металлургической промышленности широкое применение получили различные способы перемешивания металлов в процессе кристаллизации. Основная цель перемешивания - обеспечение повышение качества металла благодаря выравниванию температуры и химического состава расплавленного металла, получению однородной среды. Изучение процессов перемешивания жидких металлов при внешнем воздействии приобрело приоритетное значение в современной металлургической технологии в связи с проблемой управления гидродинамикой расплавленного металла [1]. Существует широкий спектр видов воздействия на затвердевающий металл при разливке и кристаллизации стали в УНРС, изложницах, в литейных формах: от обычного механического до электромагнитного перемешивания [2]. Решение задачи оптимизации воздействия на слиток с учетом соответствия его качества энергетическим затратам представляется очень важным направлением настоящего и будущего металлургии.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Научно-практические аспекты перемешивания исследованы во многих научных работах известных отечественных и зарубежных ученых. Весомый вклад в решение этой проблемы внесли Кочо В.С. (1945 г.), Левин Л.С. (1949), Доброхотов Н.Н. (1953), Казанцев И.Г. (1954), Осипов А.И., Шварцман Л.А. (1955), Глинков Г.М. и Шевцов Е.К. (1969-71), Скребцов А.М. (1970-76), Явойский В.И., Дорофеев Г.А., Повх И.Л. (1974) и другие. По мнению ученых, знание закономерностей перемешивания и управление интенсивностью перемешивания включает следующие аспекты:

- 1) улучшение теплообмена и ускорение процесса кристаллизации;
- 2) повышение качества металла благодаря гомогенизации;
- 3) образование мелкодисперсной структуры отливки;
- 4) устранение брака и прогноз уязвимых и проблемных зон в отливке.

Многие исследователи либо уточняли методы расчета мощности перемешивания, либо

\* канд. техн. наук, доцент, Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь

определяли мощности перемешивания для новых технологий. Однако расчет параметров перемешивания и их влияния на качество слитков до сих пор является сложной задачей. Только в 80-х годах благодаря работам Капустина Е.А. и сотрудников было установлено [3], что знания мощности перемешивания недостаточно для оценки интенсивности перемешивания и там же были заложены основы феноменологической теории перемешивания. К сожалению, до этого времени в публикациях по перемешиванию не учитывались диссипативные свойства систем, а также влияния вида мощности перемешивания на интенсивность движения жидкого ядра слитка или отливки.

**Цель статьи** – на основе теоретического анализа влияния вида мощности перемешивания на интенсивность движения жидкого ядра отливки предложить и апробировать на физической модели способы прерывистого и реверсивного вынужденного перемешивания кристаллизующегося металла.

**Изложение основного материала.** В теории перемешивания, которая предложена в работах [3] и получила последующее развитие в работах [4-5], интенсивность перемешивания определяется величиной кинетической энергии макродвижения  $E_K$  в соответствии с выражением

$$\frac{dE_K}{dt} = N_{MIX} - N_{DISS} \quad (1)$$

Подведенная энергия в форме работы перемешивания определяется её мощностью  $N_{MIX}$ , которая может определенным образом зависеть от времени. Интенсивность перемешивания  $E_K$  зависит не только от мощности перемешивания  $N_{MIX}$ , но и от диссипативных свойств системы, которые определяются мощностью диссипации  $N_{DISS}$ . Очевидно, для поддержания заданной интенсивности макродвижения ( $E_K = const$ ) необходимо подводить определенное количество энергии в единицу времени извне, равное энергии диссипации  $N_{MIX} = N_{DISS}$ .

Мощность диссипации  $N_{DISS}$  определяется геометрическими размерами и конфигурацией области, занятой расплавом, структурой течения, плотностью и вязкостью среды и другими параметрами. Режим течения среды - ламинарный, переходной, турбулентный – в свою очередь зависит от мощности перемешивания. Возникает нелинейная связь, которую в общем случае трудно установить для различных видов перемешивания. Однако, как показали дальнейшие исследования [4-5], в первом приближении можно принять, что мощность диссипации  $N_{DISS}$  пропорциональна кинетической энергии расплава по формуле:

$$N_{DISS} = \beta E_K \quad (2)$$

где  $\beta$  представляет собой параметр, получивший название коэффициент затухания движения расплава и характеризующий диссипативные свойства системы.

Подставляя выражение (2) в (1), получаем уравнение (3), где в правой части записан закон изменения мощности перемешивания в зависимости от времени  $N_{MIX} = N_{MIX}(t)$ :

$$\frac{dE_K}{dt} + \beta E_K = N_{MIX}(t) \quad (3)$$

Соответственно, возникают две практически важные в технологии перемешивания задачи. Первая, прямая задача, заключается в определении закона изменения мощности перемешивания как функции времени  $N_{MIX} = N_{MIX}(t)$  при заданном режиме интенсивности перемешивания  $E_K = E_K(t)$ . Вторая, обратная задача сводится к нахождению решения уравнения (3) для кинетической энергии макродвижения  $E_K = E_K(t)$  при различных законах изменения мощности перемешивания как функции времени  $N_{MIX} = N_{MIX}(t)$ .

Для обеих задач необходимо в первую очередь определить коэффициент затухания движения среды  $\beta$  и другие параметры, характеризующие диссипативные свойства системы. Один из способов определения параметров затухания, предложенный в работе [5], предполагает, что величина  $\beta$  является константой, характерной для данных условий кристаллизации. Тогда при отсутствии перемешивания  $N_{MIX} = 0$  и закон изменения энергии перемешивания с течением времени имеет вид

$$E_k = E_0 e^{-\beta t} \quad (4)$$

где  $E_0$  - кинетическая энергия перемешивания в начальный момент времени, задается начальными условиями перемешивания. Величина, обратная  $\beta$ , представляет собой некоторое характерное время затухания (время релаксации) системы  $t_R = 1/\beta$ . В опытах по определению

коэффициента затухания  $\beta$  на физической модели в работе [6] было подтверждено, что кинетическая энергия системы изменяется экспоненциально с течением времени в соответствии с формулой (4). При этом  $\beta$  зависит не только от объема расплава, но и от режима перемешивания. Таким образом, предложенная теория перемешивания, является феноменологической, поскольку она не может определить зависимость коэффициента затухания  $\beta$  от многих факторов и требует проведения дополнительных экспериментов. Тем не менее, она позволяет в дальнейшем получить ряд важных закономерностей, дающих возможность провести анализ влияния вида мощности на интенсивность перемешивания. Рассмотрим следующие практически важные случаи:

**а) постоянная мощность перемешивания  $N_{MIX}=N_O=const>0$ .**

При подводе постоянной мощности перемешивания  $N_{MIX}=N_O=const$  и в предположении  $\beta=const$ , закон изменения энергии перемешивания с течением времени в соответствии с уравнением

$$E_K = \frac{1}{\beta} [N_O - (N_O - \beta E_O) e^{-\beta t}]. \quad (5)$$

Как видно, в течение некоторого характерного времени устанавливается определенный режим перемешивания с асимптотическим значением энергии  $E_S=N_O/\beta$ . Введем безразмерные величины: безразмерное время  $\tau=t/t_R$ , безразмерную мощность  $n=N/N_O$ , безразмерную (относительную) энергию  $\varepsilon=E_K/E_S$ , и безразмерную начальную энергию  $\varepsilon_O=E_O/E_S$ . Тогда формула (5) преобразуем к универсальному виду

$$\varepsilon = 1 + (\varepsilon_O - 1) e^{-\tau}. \quad (6)$$

Полученная зависимость приведена на рисунке 1 для различных значений параметра  $\varepsilon_O$ . Очевидно, процесс установления стационарного режима перемешивания при любых значениях начальной кинетической энергии соответствует величине  $\tau_a=4,7$ .

**б) изменение мощности по гармоническому закону  $N_{MIX}=N_O+X \sin \omega t$**

Рассмотрим изменение кинетической энергии расплава в результате внешнего воздействия с переменной мощностью, например, по синусоидальному закону  $N_{MIX}=N_O+X \sin \omega t$ , где  $X$  некоторая амплитуда внешней мощности,  $\omega$  – частота колебаний мощности. Интенсивность перемешивания определяется величиной кинетической энергии  $E_K$  в соответствии с уравнением (1), решение которого представляет собой сумму общего решение уравнения (1) в виде (5) и любого частного решения уравнения (7) в виде (8):

$$\frac{dE_K}{dt} + \beta E_K = N_O + X \sin \omega t, \quad (7)$$

$$E_K = \frac{1}{\beta} [N_O - (N_O - \beta E_O) e^{-\beta t}] + \frac{X \omega}{\beta^2 + \omega^2} e^{-\beta t} + \frac{X(\beta \sin \omega t - \omega \cos \omega t)}{\beta^2 + \omega^2} \quad (8)$$

Анализ решения (8) показывает, что гармонические колебания мощности приводят к осцилляциям энергии перемешивания, накладываемым на установившийся режим перемешивания. При больших частотах и малых амплитудах мощности осцилляции слабые и энергия в макрообъеме отливки практически остается на одинаковом уровне. Это значит, что высокочастотные колебания способствуют перемешиванию в микрообъемах, что имеет место при ультразвуковой обработке затвердевающего расплава. При низких частотах и больших амплитудах мощности роль колебаний становится значительной, так как будет происходить «раскачка» объема расплава. Такого рода колебания возможны, например, при вибрационном воздействии на кристаллизующийся слиток. При наличии в системе собственных колебаний определенной частоты (например, вследствие естественной тепловой конвекции) внешнее воздействие приведет к резонансным явлениям в расплаве, что может представлять особый интерес для дальнейших исследований и приложений.

**в) комбинированные способы перемешивания – прерывистый и реверсивный.**

Комбинируя «включение» ( $N_{MIX}=N_O=const>0$ ) и «выключение» мощности ( $N_{MIX}=N_O=0$ ) можно осуществлять перемешивание в режиме негармонических (пилообразных) колебаний. Как видно из рисунка 2, осуществив разгон расплава до установившегося режима перемешивания ( $N_{MIX}=N_O=const>0$ ), можно прервать перемешивание ( $N_{MIX}=N_O=0$ ), выключив мощность

(пунктирная кривая) и по истечении определенного времени  $\tau_a=4,7$  дождаться полной остановки движения расплава. Затем процесс повторяется, и мы получаем периодический пилообразный режим перемешивания, который можно назвать прерывистым (рисунок 3). Он характеризуется значительной экономией энергии источника мощности и простотой реализации.

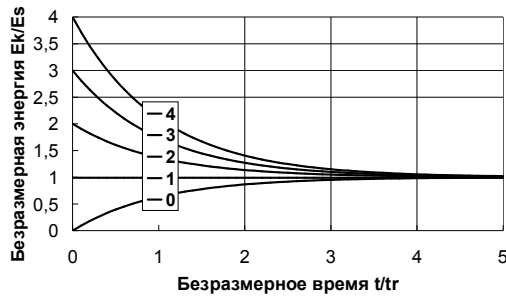


Рис.1 – Установление стационарного режима перемешивания. Цифры у кривых - значения безразмерной начальной кинетической энергии  $\varepsilon_0$  перемешивания.

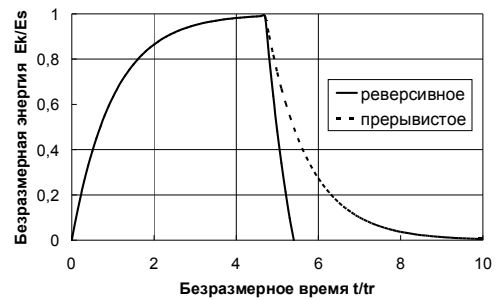


Рис.2 – Изменение безразмерной кинетической энергии системы с течением времени при ее прерывистом и реверсивном перемешивании

Однако наибольший интерес представляет случай, когда мощность перемешивания отрицательна ( $N_{MIX}=N_O=const<0$ ). Каков физический смысл отрицательной мощности и возможна ли реализация этого случая перемешивания? При подводе постоянной по модулю, но «положительной» или «отрицательной» мощности перемешивания  $N_{MIX}=\pm N_O$  и в предположении  $\beta=const$ , закон изменения энергии перемешивания с течением времени формально представляет собой решение уравнения (1) в обычном (9) и безразмерном виде (10):

$$E_K = E_O e^{-\beta t} \pm \frac{N_O}{\beta} (1 - e^{-\beta t}) \quad (9)$$

$$\varepsilon = \pm 1 + (\varepsilon_0 \mp 1) e^{-\tau} \quad (10)$$

Очевидно, решение уравнений (9, 10) имеет смысл только при положительных значениях энергии  $E_K \geq 0$ . Это означает, что отрицательная мощность может быть реализована только при наличии начальной кинетической энергии перемешивания  $E_O$ . При «включении» отрицательной мощности  $N_{MIX}=N_O<0$  внешние силы тормозят движение и помогают останавливать расплав (рисунок 2, сплошная линия после разгона). Если при полной остановке расплава ( $E_K=0$ ) источник отрицательной мощности продолжает действовать, то физически это означает, что расплав должен разогнаться, изменяя направление скоростей движения на противоположные. Для расчета энергии перемешивания снова используются формулы (5,6), но со сдвигом по времени в начало отсчета. Комбинируя «включение» положительной и «отрицательной» мощности можно осуществлять перемешивание в режиме негармонических (пилообразных) колебаний. Как видно из рисунка 2, осуществив разгон расплава до установившегося режима перемешивания за время  $\tau_a=4,7$  при  $N_O=const>0$ , можно затормозить перемешивание при  $N_O=const<0$ , включив отрицательную мощность (сплошная кривая). По истечении определенного времени  $\tau_s=0,7$  происходит полная остановка расплава, а затем за то же время  $\tau_a=4,7$  при  $N_O=const<0$  осуществляется разгон в противоположном направлении. Затем процесс повторяется, и мы получаем периодический пилообразный режим перемешивания, который можно назвать реверсивным (рисунок 4).

Предложенные способы перемешивания были реализованы на физической модели [6]. Способ прерывистого перемешивания дает увеличение скорости охлаждения изложницы, однако не позволяет измельчить кристаллы, образующиеся в ходе объемной кристаллизации из расплава. В случае реверсивного перемешивания наблюдается существенное увеличение скорости охлаждения системы и образуется мелкодисперсная кристаллическая структура. Последний способ является более перспективным для улучшения качества отливок.

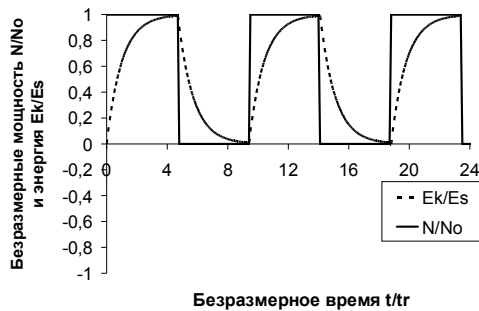


Рис.3 – Циклическое изменение безразмерной кинетической энергии системы с течением времени при ее вынужденном прерывистом перемешивании

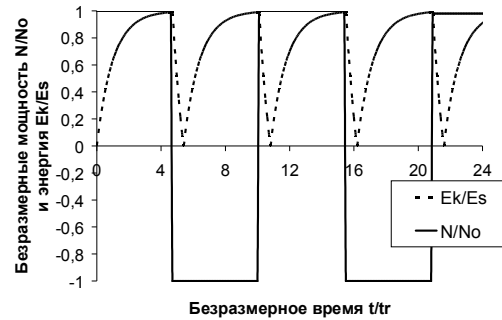


Рис.4 – Циклическое изменение безразмерной кинетической энергии системы с течением времени при ее вынужденном реверсивном перемешивании

### Выводы

1. Учет мощностей перемешивания и диссипации позволил в исследованиях найти зависимость кинетической энергии расплава от времени при различных режимах вынужденного перемешивания.
2. На основе теоретического анализа влияния вида мощности перемешивания на интенсивность движения жидкого ядра отливки предложены способы прерывистого и реверсивного перемешивания кристаллизующегося металла. Апробация на физической модели отдает предпочтение реверсивному перемешиванию.

### Список использованных источников:

1. Скворцов А.А. Влияние внешних воздействий на процесс формирования слитков и заготовок. / А.А.Скворцов, А.Д. Акименко, В.А.Ульянов. - М.: Металлургия, 1991. - 216 с.
2. Ефимов В.А., Эльдарханов А.С. Современные технологии разлива и кристаллизации сплавов. / В.А.Ефимов, А.С. Эльдарханов, - М.: Машиностроение, 1998. - 360 с.
3. Капустин Е.А. Роль переноса вещества и энергии в ваннах сталеплавильных агрегатах // Вопросы теории и практики сталеплавильного производства. / Е.А. Капустин. – М.: Металлургия, 1991. – С.14 – 23.
4. Жук В.И. Энергия и мощность перемешивания расплава при затвердевании металла // Вісник Приазов. держ. техн. ун-ту: Зб. наук. пр. / В.И Жук, – Маріуполь, 2007. – Вип. 17. – С. 73 – 77.
5. Жук В.И. Закономерности перемешивания жидких металлов при внешнем воздействии // Вісник Приазов. держ. техн. ун-ту: Зб. наук. пр. / В.И Жук, – Маріуполь, 2009. – Вип. 19. – С. 73 – 77.
6. Жук В.И. Исследование влияния механического перемешивания на объемную кристаллизацию методом физического моделирования // Вісник Приазов. держ. техн. ун-ту: Зб. наук. пр. / В.И Жук, – Маріуполь, 2004. – Вип. 14. – С. 81 – 85.

Рецензент А. М. Скребцов,  
 д-р техн. наук, проф., ПГТУ

Статья поступила 23.02.2010