

В. Н. Цуркин

Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев

К ВОПРОСУ О РЕЗОНАНСНЫХ ПРОЦЕССАХ ПРИ ОБРАБОТКЕ РАСПЛАВА В ТЕХНОЛОГИЯХ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Проведен анализ состояния вопроса о резонансных процессах, которые могут генерироваться в расплаве при внешнем физическом воздействии. Выделены возможные факторы проявлений резонансных эффектов, при этом акцентировано внимание на возможное взаимодействие элементарных колебательных процессов в металлической системе, что может существенно усложнить их накачку.

Ключевые слова: расплав, система уровней структуры, колебательные системы, волновые процессы, резонанс, физические принципы нагружения.

Проведено аналіз стану питання про резонансні процеси, які можуть бути реалізовані в розплаві за умов зовнішнього фізичного впливу. Виділено можливі фактори прояву резонансних ефектів, при цьому акцентовано увагу на можливу взаємодію елементарних коливальних процесів у металевій системі, що може суттєво ускладнити їх накачку.

Ключові слова: розплав, система рівнів структури, коливальні системи, хвильові процеси, резонанс, фізичні принципи навантаження.

The problem of resonant processes that may generate in a melt by the exterior physical effect is analyzed. Possible factors of resonant effect realization are outlined; the attention is thus paid to possible interaction of elementary oscillating processes in a metal system, which may significantly influence on their accelerated excitation.

Keywords: melt, system of structural levels, oscillating systems, wave processes, physical principles of stressing.

Введение

Методы внешнего воздействия на расплав в технологических операциях литейного производства основаны на различных физических принципах, для которых термосиловые характеристики нагружения можно формализовать уравнениями теории колебаний. Если же рассмотреть объект нагружения как сложную многофазную систему, а его структуру – в виде системы уровней с иерархией (от макро до атомарного) [1, 2], то в ней можно выделить отдельные элементы и автономные (локальные) процессы, для которых также можно определить характеристики, формализуемые уравнениями (или зависимостями) теорий колебаний. В этом случае возможны эффекты, приводящие к резонансам. Продуктивность такой гипотезы заключается, прежде всего, в том, что за счет эффекта резонанса в расплаве можно рационально организовать активизацию или подавление естественных процессов и таким образом существенно изменить кристаллизационную способность металлической системы.

В последнее время опубликован ряд работ, в которых эффекты, обнаруженные в эксперименте или же предполагаемые на основе в общем-то логических рассуждений, поясняются явлениями резонанса [3-7]. С точки зрения физической природы этого явления выводы и предположения в указанных работах на качественном уровне не противоречивы, но и не убедительны без адекватного экспериментального подтверждения, учитывающего необходимые и достаточные признаки резонанса.

В противном случае обнаруженные эффекты можно пояснить обычными вибрационными процессами, минуя резонанс.

В этом случае в рамках неопределенности можно выделить следующую проблему; определить признаки и показать возможности резонансных явлений в расплаве в технологических процессах литья. Следует подчеркнуть, что именно неопределенность этой проблемы из-за отсутствия доказательных представлений резонанса в расплаве не связывает ее пока с целевым назначением – обеспечением высокого качества литой металлопродукции [2].

Цель работы – проанализировать возможные факторы проявлений резонансных эффектов в расплаве в технологических процессах литья .

Анализ состояния вопроса

В данной работе представим некоторые понятия, известные из физики.

Резонанс как один из возможных факторов колебательных процессов – это явление возрастания амплитуды вынужденных колебаний в какой-либо колебательной системе, наступающее при приближении частоты внешнего периодического воздействия к одной из частот ее собственных колебаний. Мерой качества резонанса является добротность колебательной системы, так называемый Q -фактор, который показывает, во сколько раз амплитуда вынужденных колебаний увеличивается и определяет время нарастания колебаний (или их затухания после отключения источника). Величина $Q \sim n$, где n – число циклов колебаний [8]. Увеличение величины Q даже при слабой накачке может обеспечить появление нелинейных эффектов, которые могут привести к разрушению системы, например, к диспергированию твердой фазы или кластера. С другой стороны, малые величины Q характеризуются активным увеличением диссипативных свойств среды. Это может играть положительную роль при обработке расплава, например, для снижения скорости охлаждения или формирования активных синергетических эффектов (явлений самоорганизации) [9]. Нельзя не учитывать тот факт, что в металлической системе перед и в процессе кристаллизации возникают кратковременные колебательные (волновые) процессы. Потому здесь добротность нужно рассматривать как принципиальную возможность раскачать колебательную систему.

Таким образом, выходя из этого базового определения, для обнаружения или реализации процесса резонанса нужно достигнуть совпадения частоты колебательной системы и частоты вынуждающей силы. Но сам эффект резонанса можно определить только мерой его качества – добротностью. Заметим, что колебательные (волновые) процессы в расплаве имеют различную физическую природу и их не всегда можно представить принципами механики.

Математически эти процессы имеют сходство с механическими, только входящие в них величины имеют разный физический смысл. Различия в этом единстве определяет прагматический аспект внешнего воздействия, а сходство математических моделей можно описать некими общими принципами [8, 10].

Принцип первый – возможность представить систему сплошной средой, то есть ее элементы статистически одинаковые. Принцип второй – движение (информация) передается от одной частицы к другой. Принцип третий – система должна быть открытой и диссипативной, то есть такой, чтобы в нее постоянно или дискретно поступали и уходили вещество и энергия. Поэтому в каждом рассматриваемом случае нужно учитывать как физический принцип нагружения колебательной системы, так и физический механизм резонансного отклика, которые должны совпадать [10]. Но здесь необходимо акцентировать внимание на том, что для таких систем не всегда приемлемо понятие групповой скорости волны и не всегда реализуется перенос энергии.

Колебательные признаки в расплаве проявляются в термодинамических процессах и химических реакциях. Так, в работе [11] отмечается, что в температурном интервале кристаллизации фазовые переходы не являются монотонными. Здесь происходят локальные (в объеме) сбросы и поглощения энергии, характерные

для колебательных процессов. В работе [12] показано, что немонотонный характер кристаллизации играет одну из ключевых ролей в возникновении зародышей кристаллизации. Авторы работы [13] анализируют существование анизотропии подвижности межфазной границы и ее изменение с переохлаждением расплава. Показано существенное ее влияние на скорость и форму роста дендрита, что нашло специфическое отражение в характере кинетической кривой, выразившееся в появлении чередующихся на ней максимумов и минимумов. Попытка описать температурные волны сделана в работе [6]. Здесь же анализируются возможные механизмы резонансов в локальных зонах металла, которые характеризуются автоколебательными процессами. Развитие этой гипотезы представлено в работе [7], где предложена физико-математическая модель теплообмена, учитывающая квантовые особенности теплопередачи. В отличие от традиционных решений краевых задач теплопроводности рассмотрен отдельный вклад в создание температурной волны колебательной, вращательной и поступательной компонент переноса тепла. Более ранние представления такого подхода сделаны О. Н. Шабловским [14, 15], который рассматривал коэффициент теплопроводности с градиентной нелинейностью температуры $\partial T/\partial t$.

Химические процессы, реализуемые в расплаве, приводят к перестройке его структуры. И если сам процесс протекает непрерывно, перестройка структуры складывается из элементарных дискретных актов, происходящих на атомарном уровне [16]. Их ход также может быть немонотонным и описанным уравнениями теории колебаний. Фрагментарно эти вопросы анализируются для неорганических материалов, например, в работах [5, 17, 18]. Рассмотрев критические аспекты подобных представлений, можно выделить собственные частоты анализируемых колебательных систем. Но здесь проблема реализации резонанса, прежде всего, упирается в определение длины цуга такой волны и формирование адекватного физического принципа нагружения, то есть здесь важно показать добротность такой колебательной системы, значение которой, как уже отмечалось, покажет качество резонанса.

Можно предположить, что для проявления резонанса в химических и термодинамических процессах наиболее эффективным может быть воздействие электрическим и (или) магнитным полем с соответствующей частотой, что в принципе технически несложно реализовать. Кроме того, как известно, в отличие от чисто теплового нагружения системы нагружение электрическим или магнитным полем обеспечивает не только изменение внутренней энергии системы, но и приводит к совершению работы над ней. Разбег частот немонотонных термодинамических и химических процессов весьма широкий, но скорее всего он соответствует кило- и мегагерцевому диапазонам [4-7, 18-20]. Для резонанса, активизирующего термодинамические и химические процессы в металлической системе, скорость перехода в состояние равновесия определяется величиной произведения соответствующего кинетического коэффициента лимитирующей стадии на термодинамическую обобщенную силу (соотношение Онсагера). Поэтому логично предположить определенную связь добротности колебательной системы и указанного соотношения.

Что касается колебательных процессов в расплаве, имеющих механическую природу, то здесь целесообразно обратиться к понятию собственных частот таких элементов расплава, как пузырьки, неметаллические включения, растущие кристаллы, кластеры, атомы, а также и макрообъем расплава. Здесь точки системы в случае нормальных колебаний вибрируют синфазно или противофазно с одной и той же (собственной) частотой, определяемой для чисто колебательных степеней свободы системы. Для сплошных колебательных систем нормальные колебания – это стоячие волны, для них собственные частоты образуют дискретную последовательность возможных собственных частот [21]. Так, для свободного стержня со свободными концами собственные частоты продольных нормальных колебаний

$$f_n = n \cdot C/(2l), \quad (1)$$

где n – номер колебаний; C – скорость звука в материале стержня; l – длина стержня.

Формулу (1) можно применять для оценки собственных частот твердых включений в жидком металле, растущих кристаллов и самого объема металла. Эти оценки будут завышенными, так как формула (1) не учитывает колебаний стержня в вязкой жидкости расплава, а также присоединенную массу жидкости.

Для линейной системы с несколькими степенями свободы собственные колебания могут происходить с разными собственными частотами, образуя стоячие волны в разных направлениях. В этом случае возможен одновременный резонанс для разных частот. Например, для вытянутого твердого включения в расплаве формула (1) применима для разных значений l .

Вопрос собственных колебаний пузырьков в воде подробно рассматривался многими авторами как при их осцилляции, так и пульсации. Но даже при колебании пузырьков в воде они осторожно отнесли к выводу формул для собственных частот в силу многофакторной постановки такой многопараметрической задачи. Здесь чаще всего прибегают к оценке частоты гармонических пульсаций газового пузырька с помощью линейной теории Миннерта [22]

$$f = \frac{1}{2\pi R} \sqrt{\frac{3\gamma}{\rho_{\text{ж}}} \left(P_{0\text{ж}} + \frac{2\sigma}{R} \right)}, \quad (2)$$

где γ – показатель политропы; R – радиус пузырька; σ – поверхностное натяжение на границе жидкость-газ; $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости; $P_{0\text{ж}}$ – статическое давление.

Для нелинейных пульсаций нужно выделить более мелкодисперсную периодичность собственных пульсаций на собственных частотах. В случае ньютоновской жидкости анализ уравнений, описывающих пульсации пузырьков, которые к тому же всплывают, поэтому могут и осциллировать, показывает, что они решаются только численно и для частных случаев [22, 23]. В принципе, последнее замечание может быть справедливым и для других элементов структуры расплава.

Что касается собственных частот тепловых колебаний атомов, то здесь можно выделить диапазон частот от 10^{-12} до 10^{-13} Гц. Для кластеров период тепловых колебаний может быть определен как [24]

$$\tau_{\text{кл}} = \frac{1}{2\pi A} \sqrt{\frac{2E_{\text{к}}}{m_{\text{кл}}}}, \quad (3)$$

где A – амплитуда колебаний кластера, $A = d_{\text{кл}} + \alpha$, $d_{\text{кл}}$ – диаметр кластера, α – ширина межкластерного разрыва, равная (0,1-0,5) а, a – кратчайшее межатомное расстояние; $E_{\text{к}} = 3/2(kTn_{\text{кл}})$, k – постоянная Больцмана, T – температура, $n_{\text{кл}}$ – количество атомов в кластере; $m_{\text{кл}}$ – средняя масса в кластере, $m_{\text{кл}} = M \cdot n_{\text{кл}}/N_0$, M – атомная масса металла, N_0 – число Авагадро.

Несложно показать, что диапазон собственных частот для кластера в соответствии с формулой (3) составляет 10^{-9} - 10^{-8} Гц.

Рассмотрим некоторые аспекты, связанные с принципом накачки резонанса внешними физическими полями. При этом еще раз подчеркнем, что физические принципы нагружения и резонансного отклика должны совпадать. Очевидно, для реализации резонанса внешнее нагружение должно формировать волновое поле, которое не всегда может быть строго гармоническим. Но процедуру разложения волн сложной формы на простые синусоидальные, предложенную Фурье, можно использовать не всегда, равно как и складывать синусоиды в волну сложной формы. Эти процедуры справедливы только при условии линейности [25].

Отметим, что в расплаве всегда могут присутствовать условия для возникновения

параметрических колебаний, которые в отличие от вынужденных поддерживаются внешними силами косвенно – через изменения параметров системы. В этом случае возможен параметрический резонанс [21], для которого соотношение частот имеет вид $\Theta = 2\omega$, где Θ – частота возмущающей силы, ω – частота свободных колебаний.

Учитывая, что расплав в силу своей структуры и его характеристик является сложной многофакторной многопараметрической системой [1, 2], для анализа резонансных процессов необходимо рассматривать не только собственные частоты элементов структуры, но и частотные спектры всей металлической системы. В работе [20] их предлагается определять методами анализа акустической эмиссии, но с очень важной оговоркой – только для определенных условий. Кроме того, эти процессы практически всегда несинусоидальны (например, [11-14, 26]), то есть нелинейны. В результате их взаимодействия или при наложении цуга волн они существенно трансформируются вплоть до самосинхронизации. Ее результатом может быть появление волн с параметрами, отличающимися существенно от параметров взаимодействующих волн [8, 10, 25].

Выводы

- Использование явления резонанса в процессах литья может открыть новые возможности для повышения качества литого металла.
- Развитие гипотезы о реализации резонансных процессов в расплаве может заложить основы нового понимания взаимосвязи структуры и свойств металлической системы как перед кристаллизацией, так и в процессе ее.
- Приходится констатировать, что, несмотря на значительный прогресс, достигнутый в принципиальном понимании явления резонанса как физического явления, его использование в практических целях литейного производства пока не реализуется. Опубликованные работы были направлены скорее на понимание возможностей резонанса в расплаве, чем на активное целенаправленное формирование этого явления. Доказательные представления резонансных процессов пока не получили своего развития из-за их многофакторности и многовариантности. Такие представления должны содержать в себе обоснованные физические принципы реализации резонанса и его экспертизу.
- Учитывая многофакторность и многовариантность эффекта резонанса в сложной системе структуры расплава, для поиска алгоритмов взаимосвязи между процессами нагружения и резонансного отклика можно рекомендовать, воспользовавшись терминологией системного анализа, следующее: структурные элементы металлической системы расплава описываются некими отображениями (функциями), принципы управления которыми определяют с позиций формализованного языка. Отсюда понятна роль систем с распределенными параметрами, в качестве которых выступают распределения физических величин (свойств и параметров структуры). Математически они описываются некими функциями, то есть проблема реализации резонанса может быть решена математическими приемами, когда определяются совпадения частот и добротность в колебательной системе. Но постановка таких задач должна точно учитывать физические аспекты процессов накачки и резонансного отклика.



Список литературы

1. Гуляев Б. Б., Пряхин В. И., Колокольцев В. М. Иерархия структур и механические свойства литой стали // Литейн. пр-во. – 1986. – № 10. – С. 9-12.
2. Цуркин В. Н. Концепции управления качеством литого металла // Металл и литье Украины. – 2008. – № 9. – С. 20-23.

3. Резонансное воздействие электромагнитных полей на фазовые превращения в стали / А. П. Клименко, А. И. Карнаух, Г. Ю. Станчиц и др. // Теория и практика металлургии. – 2002. – № 3. – С. 54-57.
4. Петров С. С., Пригунова А. Г., Пригунов С. В. Трансформация структуры силуминов при воздействии на расплав постоянного электрического тока // Там же. – 2006. – № 4-5. – С. 89-91.
5. Бибииков А. М., Халтурин И. П., Зарембо В. И. Управление структурообразованием и свойствами литых материалов слабым акустическим воздействием // Литейн. пр-во. – 2007. – № 7. – С. 12-14.
6. Тындюк В. З., Шинский О. И., Кравченко В. П. Температурные волны в зоне кристаллизации вокруг армирующих элементов отливки // Металл и литье Украины. – 2009. – № 4-5. – С. 34-39.
7. Квантовые особенности теплообмена и кристаллизации жидкого металла. Сообщение 1 / В. З. Тындюк, О. И. Шинский, В. П. Кравченко и др. // Процессы литья. – 2011. – № 2 (86). – С. 60-70.
8. Руденко О. В. Нелинейные стоячие волны, резонансные явления и частотные характеристики распределенных систем // Актуальні аспекти фізико-механічних досліджень. Акустика і хвилі. – Київ: Наук. думка, 2007. – С. 278-316.
9. Семенов Б. И., Иванова В. С. Концепция и средства управления формированием кристаллического строения отливок в новых методах литья // Литейн. пр-во. – 2001. – № 5. – С. 20-25.
10. Кадомцев Б. Б., Рыдник В. И. Волны вокруг нас. – М.: Знание, 1981. – 152 с.
11. Романов Р. А., Крашанинин В. А., Ватолин Н. А. Особенности неравновесной кристаллизации железоуглеродистых расплавов в больших объемах // Расплавы. – 2002. – № 6. – С. 3-10.
12. Кластерные модели жидкости и пути повышения качества металлических отливок / В. И. Большаков, Г. М. Воробьев, Л. С. Кривуша и др. // Теория и практика металлургии. – 2010. – № 5-6. – С. 120-123.
13. Есин В. О., Панкин Г. Н., Тарабаев Л. П. Влияние анизотропии подвижности межфазной границы на кинетику роста дендритного олова // Докл. АН СССР. – 1972. – Т. 205, № 1. – С. 74-77.
14. Шабловский О. Н. Закономерности корреляции между скоростью роста кристалла и переохлаждением расплава // Расплавы. – 2003. – № 4. – С. 52-60.
15. Шабловский О. Н. Тепловая градиентная катастрофа и рост двухмерного свободного дендрита в переохлажденном расплаве // Прикладная физика. – 2007. – № 3. – С. 29-36.
16. Цуркин В. Н. Влияние системы структур металлического расплава на его физические свойства // Вісник УМТ. – 2011. – № 4. – С. 11-19.
17. Зарембо В. И., Киселева О. Л., Колесников А. А. Структурирование неорганических материалов под действием слабых электромагнитных полей радиочастотного диапазона // Неорганические материалы. – 2004. – Т. 40, № 1. – С. 86-94.
18. Увеличение скоростей гетерогенных физико-химических превращений в режиме резонансного электромагнитно-акустического преобразования / О. Л. Киселева, А. А. Колесников, В. И. Зарембо и др. // Химическая промышленность. – 2003. – Т. 80, № 5. – С. 12-24.
19. Головки В. П., Коваль Ю. М., Щербань Н. В. Використання сигналів ерс для дослідження швидкості при магнітному перетворенні в системі Fe-Ni // Металлофізика і новітні технології. – 2009. – Т. 31, № 12. – С. 1631-1640.
20. Никулин С. А., Ханин В. Г. Мониторинг материалов, процессов и технологий методом измерения акустической эмиссии // МИТОМ. – 1999. – № 4. – С. 40-48.
21. Бабаков И. М. Теория колебаний. – М.: Наука, 1968. – 559 с.
22. Акуличев В. А. Пульсации кавитационных полостей // Мощные ультразвуковые поля / Под ред. Л. Д. Розенберга. – М.: Наука, 1968. – С. 129-166.
23. Сиротюк М. Г. Экспериментальные исследования ультразвуковой кавитации // Мощные ультразвуковые поля / Под ред. Л. Д. Розенберга. – М.: Наука, 1968. – С. 167-220.
24. Гаврилин И. В. О конкурентной кристаллизации металлов и сплавов // Литейн. пр-во. – 1999. – № 6. – С. 8-10.
25. Дж. Пирс. Почти все о волнах: Пер. с англ. М. Д. Карасева. – М.: Мир, 1976. – 175 с.
26. Обработка алюминиевого расплава в магнитодинамической установке с использованием «пинч – эффекта» / В. И. Дубоделов, Н. А. Слажнев Н. А., В. Н. Фикссен и др. // Процессы литья. – 2006. – № 4. – С. 58-65.

Поступила 03.08.2012