

Самосинхронизация динамических процессов в литейной форме

Показано, что существующие методы синхронизации состояний в системе отливка-форма встречают существенные препятствия при попытке их реализации на этапах проектирования и управления из-за внешних воздействий. Предложены технологические методы, обеспечивающие самосинхронизацию термической и массовой подсистем в объектах литейного производства.

Ключевые слова: синхронизация, динамические подсистемы, технологические методы, литейное производство, литейная форма, математические модели

Повышение качества литой продукции с учетом требований современного машиностроения невозможно без управления тепломассообменными процессами, происходящими непосредственно в литейной форме после заливки ее металлом [1].

С другой стороны, специфика литейного производства такова, что реальное управление системой отливка-форма из-за возникающих технических и экономических проблем чрезвычайно затруднено. Фактически управление этим объектом является разомкнутым, то есть все управляющие воздействия на процесс заканчиваются, как правило, на стадии его проектирования [2], что, в свою очередь, предъявляет жесткие требования к используемым при этом математическим моделям процессов, а также ограничения на достоверность информации о свойствах применяемых материалов.

К сожалению, в реальной жизни математические модели из-за многофакторности объектов литейного производства неточны, а свойства формовочных, шихтовых, и вспомогательных материалов существенно непостоянны. В сочетании с невозможностью приложения управляющих воздействий эти факторы фактически ставят непреодолимый барьер на пути реализации самых современных теоретических идей, например, идей, синхронизирующих проектирование и управление [1, 2].

Поэтому целью настоящей работы является попытка технологическими методами обеспечить такие свойства системы отливка-форма, которые обеспечивали бы автоматическую корректировку характеристик литейной формы по мере ее охлаждения с отливкой, или – для случая синхронизирующего управления – самосинхронизацию [3, 4].

Рассмотрим в качестве примера динамического объекта, который нуждается в самосинхронизации, систему песчаная форма – отливка.

Выбор этого объекта обоснован тем, что:

– он природно делится, по меньшей мере, на две подсистемы: отливка и форма;

– между подсистемами существует весьма тесная связь – все сдвиги и события, которые происходят в одной подсистеме, немедленно отражаются на другой;

– существует явным образом выраженная цель синхронизации событий в подсистемах – качество отливок.

Пусть в нашем примере в каждой из подсистем фазовое пространство одномерное, а именно: подсистема «отливка» характеризуется температурой T , а подсистема «песчаная форма» – давлением газов в рабочем слое P . Рассмотрим систему литейная форма – отливка как динамическую, то есть такую, в которой за любым начальным состоянием $y_0 \in R^n$ дальнейшая траектория ее движения $y(\tau, y_0)$ в n -мерном фазовом пространстве y при $\tau \in [0, +\infty)$ определенная однозначно [5].

В работе [1] установлено, что при литье в песчано-смоляные формы одновременно (с некоторым допуском ϵ) и безотносительно к конкретному значению времени достижения температурой отливки значения $T = 1743$ К и давлением газов в порах песчаной формы значения $P = 215$ Па обеспечивает получение стальных отливок с качественной поверхностью [1]. Тогда у системы литейная форма – отливка $n = 2$, а вектор фазового состояния $y(\tau, y_0)$ состоит из двух компонентов: $T(\tau, T_0)$ и $P(\tau, P_0)$.

Данные эксперимента, которые представлены на рис. 1, относятся к первым 35 с. существования некоторой конкретной системы отливка-форма. Начиная с начального состояния: $\tau_{\text{зал}} = 0$, $T_{\text{зал}} = 1823$ К \in НТ и $P_{\text{зал}} = 320$ Па \in НТ, где: $\tau_{\text{зал}}$ – момент окончания заливки; $P_{\text{зал}}$ – давление, которое достигается к моменту окончания заливки; НТ – зона начала траектории (определяется возможностями конкретных технологий), система в дальнейшем движется к естественному аттрактору: $T_0 = 293$ К (окружающая температура) и $P_0 = 0$ Па (превышение окружающего давления). На общем фазовом портрете процесса (рис. 2) такое движение представляет собой некоторое семейство фазовых траекторий ФТ от НТ до аттрактора – условной окружающей среды: $T_0 = 293$ К, $P_0 = 0$ Па.

Согласно данным работы [1] установлено, что при литье в песчано-смоляные формы одновременно достижение $T_s = 1743$ К (событие S_1) и $P_s = 215$ Па (событие S_2) обеспечивает получение стальных отливок с качественной поверхностью. Тогда, если на фазовом портрете обозначить точку O с координатами

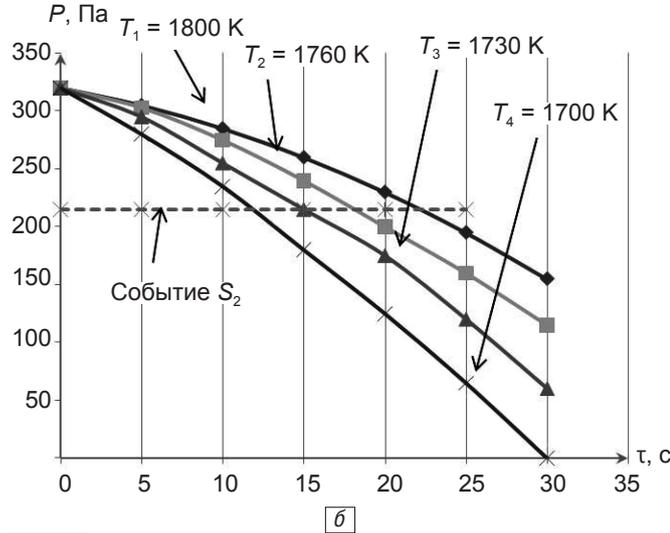
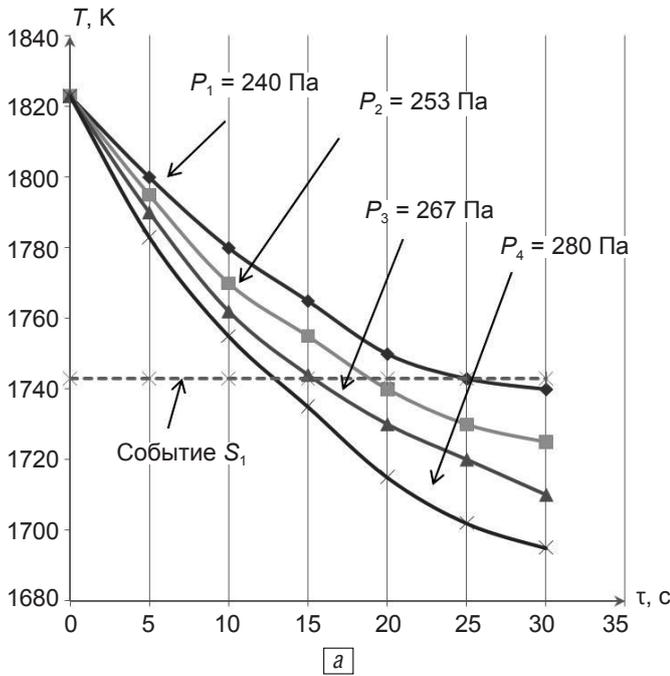


Рис. 1. Движение системы отливка-форма в двумерном фазовом пространстве: а – температура отливки T ; б – давление в порках песчаной формы P

T_S и P_S , прохождение фазовой траектории сквозь эту точку означает, что синхронизация событий состоялась. При этом время такой синхронизации не имеет значения, важно только то, что она состоялась.

Для этого необходимо, чтобы точка O входила в фазовый портрет системы, или, учитывая, что синхронизация происходит с некоторой точностью $\pm \Delta t S$, необходимо, чтобы выполнялось соотношение $\{ФТ \cup А\} \neq \emptyset$, где A – область синхронизации диаметром $2\Delta t S$ (рис. 2). Здесь $2\Delta t S$ – допустимые значения десинхронизации. Соответственно, синхронизация состоится, если участок фазовой траектории между $P(T_2)$ и $P(T_1)$ принадлежит к сечению $\{ФТ \cup А\}$, где T_1, T_2 – температуры, при которых фазовая траектория пересекается с областью A . Проектирование технологического процесса, обеспечивающее попадание фазовой траектории к области A , будем считать эффективным. САПР должна определить конкретную начальную точку области НТ и значения теплофизических характеристик компонентов (теп-

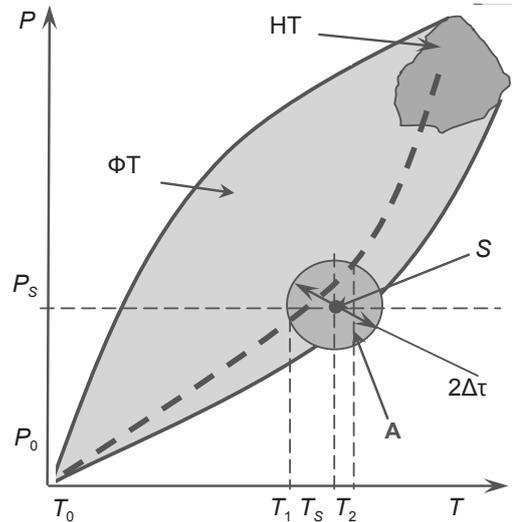


Рис. 2. Фазовый портрет процесса остывания динамической системы отливка-форма

лоемкость, теплопроводность, вязкость и т. п.), которые обеспечивают движение системы от начальной точки сквозь область A . Естественно, что на все перечисленные переменные действуют ограничения, которые вытекают из свойств материалов и возможностей соответствующей технологии.

Формула окружности радиусом $r = \Delta t_s$ с центром в точке $S (P_S, T_S)$ имеет вид

$$(P_{\text{окр}} - P_S)^2 + (T - T_S)^2 - r^2 = 0 \quad (1)$$

или

$$P_{\text{окр}}(T) = P_S + \sqrt{r^2 - (T - T_S)^2}. \quad (2)$$

Для достижения синхронизации необходимо, чтобы в интервале времени $\tau_0 - \tau_k$ хотя бы один раз выполнялось условие

$$P_{\text{ф}}(T) = P_{\text{окр}}(T) \quad (3)$$

или

$$P_{\text{ф}}(T) = P_S + \sqrt{r^2 - (T - T_S)^2}. \quad (4)$$

В уравнении (4) P_S, T_S и r – числа.

Рассмотрим окрестность точки S в качестве глобального аттрактора динамической системы – притягивающего, замкнутого, инвариантного множества в ее фазовом пространстве [5]. При этом должно выполняться соотношение

$$c[K, x(\phi, x_0)] = 0, \quad \forall x_0 \in R^n, \quad (5)$$

где K – глобальный аттрактор, множество точек x , для которых $c[K, x] < \epsilon$; $c[K, x] = \inf_{z \in K} |z - x|$; $|\cdot|$ – евклидова норма в R^n .

Выражение (5) для системы отливка-форма содержит известные дифференциальные уравнения охлаждения отливки и газовых процессов в литейной форме [7] с переменными взаимозависимыми коэффициентами. Доказательство существования и единственности его решения в этом случае весьма затруднительно, поэтому переходили от ДУЧП к разностным уравнениям вида

$$x(t+1) = f(x(t)), \quad t \in Z, \quad x \in R^n, \quad (6)$$

где t – дискретное время; Z – множество целых чисел.

Уравнение (6) всегда порождает динамическую систему с фазовым пространством R^n [6]. Это значит, для разностного уравнения (6) по начальному условию x_0 однозначно вычисляется траектория, определенная при всех $t = 0, 1, 2, \dots$ и обладающая свойством $x(t + s, x_0) = x(t, x(s, x_0))$ при всех $t \geq 0, s \geq 0$.

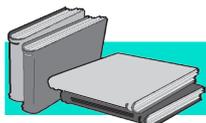
К технологическим характеристикам, параметры которых влияют на выполнение условий (5) при литье в оболочковые формы, относятся:

- свойства исходных формовочных и шихтовых материалов;
- составы формовочных смесей и сплавов;
- конструкции форм и отливок;
- дополнительные элементы конструкции формы

(холодильники, барьеры, вентиляционные каналы и т. п.);

– параметры технологии формообразования.

При проектировании технологии литья предпочтение должно быть отдано тем структурам и параметрам, которые обеспечивают наличие аттрактора, обеспечивающего самосинхронизацию состояний в системе, гарантирующего повышение качества выливаемого продукта. Для практической реализации такого подхода получен пакет математических моделей процессов, протекающих в системе отливка – песчано-смоляная форма после заливки, основанный на теоретических моделях теплообмена в гетерогенных средах и эмпирических формулах.



ЛИТЕРАТУРА

1. Лысенко Т. В., Малахов В. П., Становский А. Л. Управление процессами в литейной форме – Одесса: ВМВ, 2009. – 475 с.
2. Становский А. Л., Лысенко Т. В., Носенко Т. Н. Адаптивное автоматизированное синхронизирующее проектирование системы «отливка – песчаная форма» // Теорія і практика процесів подрібнення, розділення, змішування і ущільнення: Зб. наук. пр. – Одеса: ОНМУ, 2008. – Вип. 13. – С. 82-88.
3. Самосинхронизация. Политехнический словарь / А. Ф. Белов, В. Г. Воскобойников, В. А. Дубровский и др. // Изд. 3-е. – М: Сов. энцикл., 1989. – С. 466.
4. Комаров А. К., Комаров К. П., Кучьянов А. С. Самосинхронизация мод в УАГ : Nd³⁺ лазер // Квантовая электроника. – 2003. – Т. 33 – № 2. – С. 163-164.
5. Леонов Г. А. Странные аттракторы и классическая теория устойчивости движения // Успехи механики. – 2002. – № 3. – С. 3-43.
6. Носенко Т. І. Математичні моделі та методи синхронізації нестабільних процесів в САПР ливарного виробництва: автореф. дис... канд. техн. наук: 05.13.12. – Одеса: ОНПУ, 2009. – 19 с.
7. Серебро В. С. Основы теории газовых процессов в литейной форме. – М: Машиностроение, 1991. – 208 с.

Анотація

Бондар О. А., Прокопович І. В., Жукова А. В., Козішкурт Є. М.
Самосинхронізація динамічних процесів у ливарній формі

Показано, що існуючі методи синхронізації станів у системі виливок-форма зустрічають істотні перешкоди при спробі їхньої реалізації на етапах проектування та управління за рахунок зовнішніх впливів. Запропоновано технологічні методи, які забезпечують самосинхронізацію термічної і масової підсистем в об'єктах ливарного виробництва.

Ключові слова

синхронізація, динамічні підсистеми, технологічні методи, ливарне виробництво, ливарна форма, математичні моделі

Summary

Bondar A. A., Prokopovich I. V., Zhukova A. V., Kozishkurt E. N.
Self synchronizing of dynamic processes in a casting mold

It is shown that the existing methods of condition synchronization in the casting-mould system meet some significant obstacles when trying to implement them during the design and management due to external influences. The technological methods to ensure the self-synchronization of heat and mass subsystems in foundry objects are proposed.

Keywords

synchronization, dynamic subsystems, technological methods, foundry, casting mold, mathematical models

Поступила 17.09.12