

А.Л. Становский, д-р техн. наук, Т.В. Бибик,  
В.В. Грибова, канд. физ.-мат. наук, Одесса, Украина,  
Д.А. Желдубовский, Киев, Украина

## **ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ОТЛИВОК ПУТЕМ ОПТИМИЗАЦИИ СОСТАВНЫХ СОБЫТИЙ В ЛИТЕЙНОЙ ФОРМЕ**

*Установлено, что качество отливок во многих случаях зависит от синхронизации тех или иных событий в литейной форме. Построен фазовый портрет динамической системы «отливка – литейная форма» и рассмотрена проблема синхронизации составных событий в процессе охлаждения такой системы после заливки. Сформулирована цель управления системой: синхронизация или десинхронизация событий в ней. Показана возможность реального управления качеством отливки путем воздействия на процессы синхронизации в системе «стальная отливка – песчано-смоляная литейная форма».*

*Встановлено, що якість виливків у багатьох випадках залежить від синхронізації тих або інших подій у ливарній формі. Побудований фазовий портрет динамічної системи «вилівок – ливарна форма» і розглянута проблема синхронізації складених подій у процесі охолодження такої системи після заливання. Сформульована мета керування системою: синхронізація або десинхронізація подій у ній. Показана можливість реального керування якістю виливка шляхом впливу на процеси синхронізації в системі «сталевий виливок – піщано-смоляна ливарна форма».*

**A.L. STANOVSKIJ, T.V. BIBIK, V.V. GRIBOVA, D.A. ZHELDUBOVSKIJ  
IMPROVEMENT OF CASTING QUALITY BY OPTIMIZATION OF COMPOUND EVENTS IN  
THE FOUNDRY FORM**

*It is established that cast quality in many cases depends on synchronization of those or other events in a casting mold. The phase portrait of dynamic system «cast – a casting mold» is constructed and the problem of synchronization of compound events in the course of cooling of such system after priming is considered. The purpose of system control is formulated: synchronization or desynchronization events in it. Possibility of real quality management of casting by influence on synchronization processes in system «steel casting – a peschano-pitch casting mold» is shown.*

Искусство литья, как и любое «служенье муз», не терпит суеты. Даже такие высокоинтенсивные процессы, как тепломассообмен в динамической системе «отливка – песчаная форма», протекают относительно медленно (знаменитая отливка «Царь-колокол» остывала в земле 2 месяца!).

Это позволяет говорить о возможности управления подобными процессами путем внешнего воздействия на систему при ее охлаждении после заливки.

К сожалению, многочисленные известные зависимости фазовых переменных системы от времени (см., например, [1, 2]) не позволяют четко сформулировать цель такого управления, за исключением, пожалуй, ускорения процесса, что не всегда приводит к главному результату – качеству отливок.

В последнее время исследователи обратили внимание на важное обстоятельство, позволяющее выдвинуть в качестве цели совпадение (или, наоборот,

рот, – несовпадение) во времени заранее назначенных событий в литейной форме, к которым относят некоторые поименованные состояния на фазовом портрете объекта управления [3].

В табл. приведены примеры того, как такая синхронизация может повлиять на качество отливок.

Таблица – Влияние синхронизации событий в песчано-смоляной форме на качество стальных отливок

№№ п/п	Состояние в подсистеме «давление газов $P$ »	Состояние в подсистеме «температура отливки $T$ »	Возможные последствия синхронизации
1	$P = P_{\max}$	$T > T_{\text{лик}}$	Газовая пористость
2		$T_{\text{сол}} < T < T_{\text{лик}}$	Поверхностные газовые раковины
3		$0,9T_{\text{сол}} < T < T_{\text{сол}}$	«Апельсиновая корка»
4		$T < 0,9T_{\text{сол}}$	Отливка без дефек- тов

Наличие, как минимум, двух синхронизируемых подсистем позволяет рассматривать остывающую в форме отливку с точки зрения теории динамических систем и построить ее фазовый портрет.

Построение начинается с получения теоретических или эмпирических соотношений, связывающих фазовые переменные  $T$  и  $P$  со временем  $\tau$ :

$$T = f_1(\tau); \quad (1)$$

$$P = f_2(\tau); \quad (2)$$

при начальных и граничных условиях:

$$f_1(0) = T_0; \quad f_2(0) = P_0; \quad (3)$$

$$0 \leq \tau \leq \tau_k; \quad T_0 \leq T \leq T_{\text{ср}}; \quad P_0 \leq P \leq P_{\text{ср}}. \quad (4)$$

Выразим из (2)  $\tau$  через  $P$ :

$$\tau = f_2^{-1}(P) \quad (5)$$

и, подставляя (5) в (1), получим в итоге выражения для фазовых траекторий динамической системы «отливка – песчаная форма» в координатах «температура отливки – давление в форме»:

$$T = f_1 \left[ f_2^{-1}(P) \right]. \quad (6)$$

Все фазовые траектории, возможные в пределах ограничений, входящих в (4), составляют фазовый портрет системы в указанных координатах (рис. 1).

На рисунке точка  $S$  соответствует синхронизации событий  $T_S$  и  $P_S$  в подсистемах на пути динамической системы от точки  $(T_0; P_0)$  из области начальных условий к естественному аттрактору – точке  $(T_{\text{ср}}; P_{\text{ср}})$ , соответствующей температуре и давлению окружающей среды.

Как видно из рисунка, траектория 1 фазового портрета системы не проходит через точку  $S$ , а значит, синхронизация событий  $T_S$  и  $P_S$  не произойдет. Если специалистами-литейщиками признано, что такая синхронизация необходима для качества отливок, то целью управления становится изменение на фазовом портрете траектории 1 на траекторию 2 так, чтобы последняя прошла через точку  $S$ .

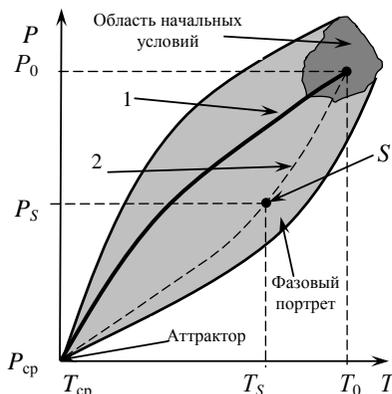


Рисунок 1 – Фазовый портрет динамической системы «отливка – песчаная форма» в координатах «температура отливки – давление в форме»

В этом случае проблема сводится к возможности математического прогнозирования таких событий с помощью уравнений (1) и (2), что может представлять значительные трудности по разным причинам. Одна из таких причин – так называемые «составные» события, когда имеет место их последовательная цепочка: первое рассчитывается аналитически, чаще всего, по уравнениям тепло- и массопереноса, а последнее проистекает из предыдущих, причем эти переходы имеют иную природу и описываются совершенно другими математическими моделями.

Примером составного события в литейной форме может служить последовательность: <достижение максимального давления в форме на границе с жидкой отливкой> – <всплытие газового пузыря>. Модель наступления первого элемента последовательности (назовем его предварительным состоянием) – дифференциальные уравнения выделения и удаления газов из в литейной формы, модель второго (основного) события – уравнения гидрогазодинамики гетерогенных сред.

В таких условиях синхронизация (десинхронизация) предварительных событий не решает задачу. На рис. 2 показано, как выполненная десинхронизация предварительных событий не решает общую задачу «развести» основные события во времени, т.к. различное время между предварительными и основными событиями в обеих подсистемах «съедает» эту разницу и основные события все-таки происходят одновременно.

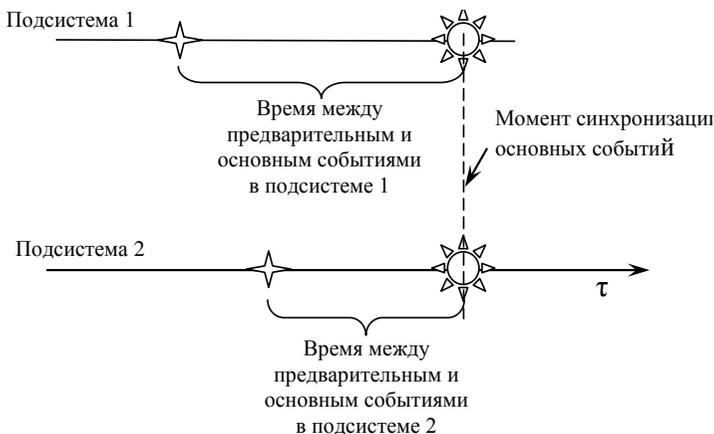


Рисунок 2 – Пример неудачной попытки десинхронизации основных событий

В случаях, когда целью является десинхронизация, борьба с этим явлением может быть сведена к решению одной из следующих задач:

- не допустить наступления одного или обоих предварительных событий;
- не допустить наступления одного или обоих основных событий (если предварительные все же произошли);
- добиться десинхронизации основных событий с учетом времени между предварительными и основными событиями в обеих подсистемах.

При попытке их постановки и решения и без того сложная математическая модель (6) еще более усложняется. Действительно, исходные уравнения (1) и (2) приобретают вид:

$$T = f_1[\tau - \alpha(T)]; \quad (7)$$

$$P = f_2[\tau - \beta(P)]; \quad (8)$$

при начальных и граничных условиях:

$$f_1(0) = T_0; \quad f_2(0) = P_0; \quad (9)$$

$$0 \leq \tau \leq \tau_k; \quad T_0 \leq T \leq T_{cp}; \quad P_0 \leq P \leq P_{cp}; \quad 0 \leq \alpha(T) \leq \alpha_{max}; \quad 0 \leq \beta(P) \leq \beta_{max}, \quad (10)$$

где  $\alpha(T)$  – время, прошедшее между предварительным и основным событиями в первой подсистеме;  $\beta(P)$  – время, прошедшее между предварительным и основным событиями во второй подсистеме.

Теперь после преобразования

$$\tau = f_2^{-1}(P) + \alpha(T) \quad (11)$$

и подстановки в (7) получим:

$$T = f_1[f_2^{-1}(P) + \alpha(T) - \beta(P)]. \quad (12)$$

Функции  $f_1(\cdot)$ ,  $\alpha(\cdot)$  и  $\beta(\cdot)$  и  $f_2^{-1}(\cdot)$  весьма сложны и, как правило, представляют собой дифференциальные уравнения в частных производных вто-

рой степени, причем обращенная функция  $f_2^{-1}(\cdot)$  не может быть выражена явно. Поэтому в компьютерных экспериментах использовали численные методы решения задач в среде *MathCAD* (номер лицензионного соглашения: 76487-ОЕМ-0061491-55112)

Анализ выражения (12) показывает, что наличие компонент  $\alpha(T)$  и  $\beta(P)$  может существенно повлиять на ход кривой 1 на рис. 1, приближая или отдаляя возможность синхронизации событий в системе. Важно также, что эти компоненты всегда положительны и входят в (12) с разными знаками, что может привести к их полной взаимной компенсации.

При построении системы управления процессом синхронизации (десинхронизации) событий в литейной форме или другом объекте литейного производства периоды времени между предварительными и основными событиями рассматривали как запаздывание по состоянию объекта управления [4]. Наличие запаздываний в контурах управления ведет к росту фазового сдвига, который может вызвать нарушение стойкости замкнутой системы управления даже при небольших значениях усиления регулятора, поэтому управляющие влияния приходится ограничивать. На практике это приводит к снижению скорости управления.

Пусть *текущее состояние* системы «отливка – песчаная форма» характеризуется вектором  $\mathbf{x}(t)$ . Компонентами этого вектора могут быть упомянутые выше температура металла  $T$  и давление газов на границе «металл-форма»  $P$ .

*Выходом* системы  $\mathbf{y}(t)$  могут быть параметры состояния динамической системы, например, интервал десинхронизации, непосредственно связанный с показателями качества отливки: наличием поверхностных дефектов, концентрацией углерода в поверхностном слое металла и т.п.

*Управление* системой характеризуется вектором  $\mathbf{u}(t)$ , компонентами которого могут быть, например, температура заливки, параметры уплотнения формы или интенсивность аспирации газов из ее пор.

Запаздывание в соответствующих цепях системы управления технологическим процессом описывается гиперболическим уравнением первого порядка [4]:

$$\frac{d\mathbf{x}(t)}{dt} = \mathbf{f}[\mathbf{x}(t), \mathbf{x}(t - \alpha), \mathbf{x}(t - \beta), \mathbf{u}(t), \mathbf{u}(t - \alpha), \mathbf{u}(t - \beta)], \quad (13)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{h}[\mathbf{x}(t), \mathbf{x}(t - \alpha), \mathbf{x}(t - \beta)] \quad (14)$$

с начальными условиями:

$$\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0; \quad (15)$$

где  $t$  – время;  $\mathbf{h}$  – передаточная функция устройства, которое оценивает качество синхронизации на выходе системы.

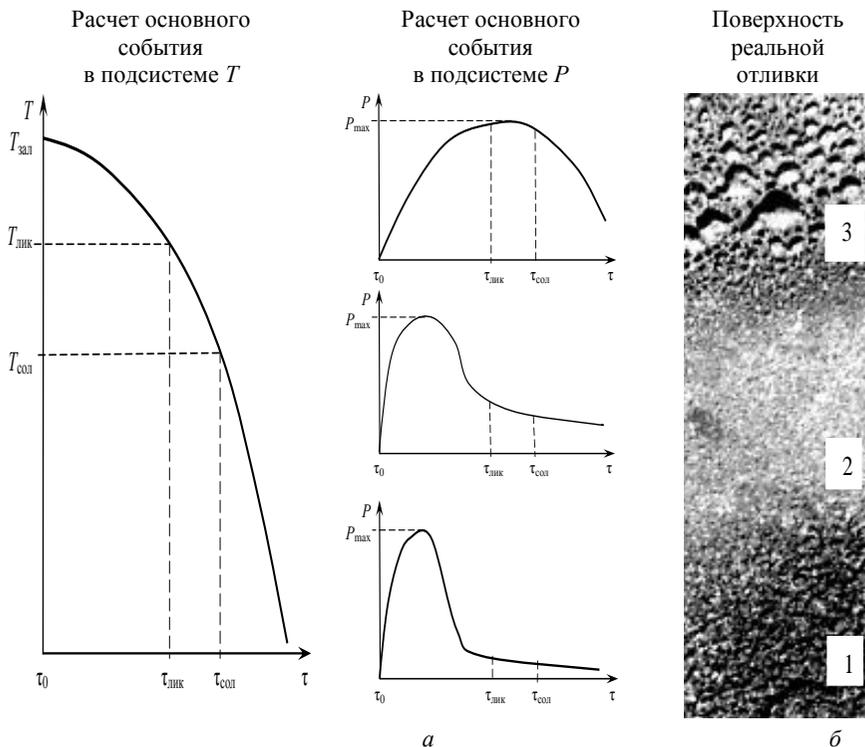


Рисунок 3 – Сравнение результатов компьютерных (а) и натуральных (б) экспериментов: «пригар» (1), «чистая поверхность» (2), «апельсиновая корка» (3)

Для таких систем управления существуют разные методы компенсации запаздываний, все они основываются на создании некоторого аналитического прогнозирующего блока в контуре управления [4].

Возможность реального управления качеством отливки путем воздействия на процессы синхронизации в системе «стальная отливка – песчано-смоляная литейная форма» подтверждает совпадение результатов компьютерных экспериментов по предложенным выше моделям и натурального эксперимента, выполненного в [5] (рис. 3).

Натурный эксперимент проходил в условиях, когда в отдельных частях отливки создавались разные условия воздействия на жидкий и кристаллизующийся металл.

В расчетах вначале рассматривалась динамическая модель системы «отливка – форма» в координатах «температура отливки – газопроницаемость стенки оболочковой формы».

Предварительными событиями в термической подсистеме считали достижение температурой отливки значения  $T_{лик}$ , а в гидравлической – снижение газопроницаемости стенки до 10 ед.

Поскольку каждое из этих событий непосредственно не сказывается на качестве отливки, какое-либо соответствие между фактом синхронизации и показателями качества не обнаружена. Поэтому их рассматривали как предварительные, приводящие к основным событиям: «окончание кристаллизации» и «давление газов в форме».

Окончательный расчет подтвердил, что описание системы с учетом составных событий в ней позволяет построить адекватную математическую модель возникновения основных поверхностных дефектов стальных отливок, незаменимую как при проектировании технологии литья, так и при построении АСУ ТП.

**Список использованных источников:** 1. *Баландин Г.Ф.* Основы теории формирования отливки. Часть 1. – М.: Машиностроение, 1976. – 328 с. 2. *Серебро В.С.* Процессы тепло- и массопереноса при формировании отливки. – К.: УМК ВО, 1992. – 79 с. 3. *Найдек В.Л., Лысенко Т.В., Становский А.Л.* Синхронизирующее управление процессами тепломассопереноса в системе отливка – форма // Литейное производство. – 2007. – № 7. – С. 23 – 26. 4. *Рей У.* Методы управления технологическими процессами. – М.: Мир, 1983. – 368 с. 5. *Становский А.Л.* Получение отливок с качественной поверхностью при литье черных металлов в формы на терморезистивных связующих / Дисс. ... канд. техн. наук: 05.16.04. – Одесса: ОПИ, 1980. – 166 с.

*Статья поступила в редколлегию 12.05.2011*

**Bibliography (transliterated):** 1. Balandin G.F. Osnovy teorii formirovaniya otlivki. Chast' 1. – М.: Mashinostroenie, 1976. – 328 s. 2. Serebro V.S. Processy teplo- i massopere-nosa pri formirovanii otlivki. – К.: UMK VO, 1992. – 79 s. 3. Najdek V.L., Lysenko T.V., Stanovskij A.L. Sinhronizirujuwee upravlenie processami teplomassopere-nosa v sisteme otlivka – forma // Litejnoe proizvodstvo. – 2007. – № 7. – S. 23 – 26. 4. Rej U. Metody upravlenija tehnologicheskimi processami. – М.: Mir, 1983. – 368 s. 5. Stanovskij A.L. Poluchenie otlivok s kachestvennoj poverhnost'ju pri lit'e chernyh metallov v formy na termoreaktivnyh svjazujuwih / Diss. ... kand. tehn. nauk: 05.16.04. – Odessa: OPI, 1980. – 166 s.