

УДК 621.74.043. 2

Богушевский В. С., Антоневич Я. К.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЛИТЬЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Технологический процесс литья под давлением (ЛПД) характеризуется быстродействием, цикличностью операций, повышенными требованиями по точности и своевременности выдачи регламентированных управляющих воздействий при получении отливок, разнообразием используемого оборудования. Передача управляющему вычислительному комплексу (УВК) функций автоматизации технологического процесса значительно повышает функциональные возможности оборудования, качество отливок и эффективность процесса в целом.

Вопросы автоматизации процесса ЛПД освещены в [1–5]. Как правило, рассматривается автоматизация отдельных функций машины ЛПД (регулирование скорости пресс-поршня, давления прессования, подпрессовки и др.). Несмотря на высокую информативность этих работ, такие вопросы, как анализ качества отливок в темпе с процессом, критерий оптимального управления качеством, не рассмотрены. Отсутствие этих составляющих в системах автоматизации значительно снижает эффективность их работы.

Исследования, представленные в статье, проводились в НТУУ «Киевский политехнический институт» по теме «Математическая модель и система управления машинами литья под давлением», Государственный регистрационный номер 0112U002173.

Целью работы является разработка критерия управления процессом ЛПД для определения заданных значений параметров управления.

В качестве критерия управления выбран коэффициент первичного выхода отливок k , равный:

$$k = n_2 / n_3,$$

где n_2 и n_3 – соответственно число годных отливок, прошедших контроль после операции обрубки, и запрессовок металла в полость пресс-формы, шт.

Цель управления – увеличить коэффициент первичного выхода отливок при работе с системой автоматизации на 0,15, ..., 0,2 по сравнению с работой без системы. Кроме того, работа с системой позволяет освоить получение отливок, производство которых без системы на машинах ЛПД невозможно.

Проведенный анализ работающих автоматизированных литейных комплексов показывает, что основной тенденцией их развития является оснащение оборудования информационными системами контроля с последующим переходом к замкнутым системам управления.

Без уточнения оценок технологических параметров в модели невозможно с заданной точностью предсказать качество отливок для каждого последующего цикла и, следовательно, управлять процессом. Анализ температурных кривых процесса, динамики прессования, плотности отливок, числа очагов, размеров и места расположения пористости отливок показал, что процесс ЛПД – стохастический и нестационарный. Поэтому для его описания наиболее пригоден адаптивный алгоритм, основанный на методе стохастической аппроксимации. В условиях нестационарного процесса он дает возможность подстраивать модель все время, уточняя оценки медленно изменяющихся параметров.

При исследовании процесса ЛПД выявлено n переменных параметров x_i ($i \in 1..n$), которые должны быть включены в математическую модель: температура металла в дозаторе ($i = 1$) и пресс-форме ($i = 2$), продолжительность выдержки металла в камере прессования ($i = 3$) и отливки в форме ($i = 4$), продолжительность нанесения смазки (масса смазки) ($i = 5$) и обдувки сжатым воздухом локальных участков формы ($i = 6$), скорость прессования ($i = 7$), пиковое давление подпрессовки ($i = 8$) и продолжительность его нарастания ($i = 9$). Наиболее весомый и полный компенсирующий параметр процесса – скорость прессования [6].

Процесс ЛПД на n -м такте может быть описан уравнением:

$$y(N) = \sum_{i=1}^n h_i(N)x_i(N),$$

где $y(N)$ – фактическое значение критерия качества отливки;

$h_i(N)$ – фактическая оценка i -го технологического параметра процесса;

$x_i(N)$ – возможное компенсирующее воздействие по i -му параметру.

Прогнозирующую модель процесса на N -м такте находим в виде:

$$y^*(N) = \sum_{i=1}^n h_i(N-1)x_i(N),$$

где $y^*(N)$ – прогнозируемое значения критерия качества отливки;

$h_i(N-1)$ – фактическая оценка i -го технологического параметра на предыдущем такте.

Уточнения оценки i -го технологического параметра проводим за итерационному алгоритму:

$$h_i(N) = h_i(N-1) + \frac{y(N) - y^*(N)}{\sum_{i=1}^n x_i^2} x_i(N).$$

Поддержание заданного качества отливки основано на принципе компенсации появляющихся возмущений технологических параметров на фиксированном такте работы машины ЛПД [7]. Максимальное давление машина должна развивать и сохранять в период от момента окончания заливки в полость пресс-формы до момента кристаллизации металла в питателе. В период, исчисляемый тысячными долями секунды, газ в порах приобретает необходимое давление, под которым затем находится отключенная от питателя затвердевающая отливка. С увеличением давления уменьшается объем пор в отливке. Более позднее повышение давления бесполезно, так как затвердевший металл питателя изолирует отливку от источника давления. Раннее повышение давления увеличивает скорость струи металла, что вредно отражается на стойкости пресс-формы, но вместе с тем улучшает условия формирования поверхности изделия.

Другим управляющим воздействием на качество поверхности отливок является смазка, которая предохраняет рабочую поверхность пресс-формы от налипания и приваривания жидкого металла, а в металлопроводе – снижает коэффициент трения и предохраняет его от задиров и износа. Слой смазки снижает температуру контакта и, в свою очередь, повышает стойкость формы, вкладышей и стержней. Низкотеплопроводная смазка более эффективно снижает температуру контакта.

При изменении тепловых и гидродинамических параметров заполнения формы в отливках возникают дефекты в виде недоливов, неслитин, узорчатой поверхности и газовой пористости. При преждевременном раскрытии пресс-формы возможно повреждение отливок толкателями, так как металл при повышенной температуре имеет пониженную прочность. При литье сплавов, склонных к трещинообразованию, нельзя передерживать отливку в пресс-форме, так как при затрудненной усадке сплава в отливке возникают трещины.

Зная компенсирующие возможности параметров, влияющих на качество отливки, и их значение в текущем цикле, рассчитаем величину компенсирующего воздействия:

$$y^{**}(M) = h_1(M-1)x_1(M) + h_2(M-1)x_2(M) + \dots + h_i(M-1)x_i(M),$$

где $y^{**}(M)$ – значение критерия качества, которое получается при подстановке в уравнение модели значений технологических параметров на M -м цикле до такта прессования;

$h_1(M-1), h_2(M-1), \dots, h_i(M-1)x_i(M)$ – оценки фактических значений параметров для такта прессования на предыдущем цикле.

Приращение критерия качества, которое необходимо компенсировать в текущем цикле на такте прессования, составляет:

$$\Delta y(M) = y - y(M),$$

где y – значение критерия качества, которое необходимо получить.

Как показали исследования, компенсирующее воздействие на такте прессования наиболее целесообразно проводить суммарным воздействием скорости прессования, давления подпрессовки и продолжительности нарастания его пикового значения, т. е.:

$$\Delta y(M) = h_7(M-1)\Delta x_7(M) + h_8(M-1)\Delta x_8(M) + h_9(M-1)\Delta x_9(M).$$

Если принять $\Delta x_7(M), \Delta x_8(M), \Delta x_9(M)$ попарно равными нулю, то можно записать:

$$\begin{aligned}\Delta x_7(M) &= \Delta y(M) / [h_7(M-1)]; \\ \Delta x_8(M) &= \Delta y(M) / [h_8(M-1)]; \\ \Delta x_9(M) &= \Delta y(M) / [h_9(M-1)].\end{aligned}$$

Тогда значения каждого из рассмотренных компенсирующих воздействий для текущего цикла соответственно будут равны:

$$\begin{aligned}\Delta x_7(M) &= x_7(M-1) + \Delta x_7(M); \\ \Delta x_8(M) &= x_8(M-1) + \Delta x_8(M); \\ \Delta x_9(M) &= x_9(M-1) + \Delta x_9(M).\end{aligned}$$

Критерий управления объектом можно охарактеризовать качеством продукции – внешним видом поверхностью отливки, ее пористостью. Внешний вид как суммарный критерий может быть представлен в виде выражения, учитывающего важность дефекта:

$$y_1(M) = B_1 / (1 + k_T + k_M + k_{HP} + k_3 + k_B + k_D + k_C),$$

где $y_1(M)$ – суммарный критерий качества отливки, учитывающий внешний вид ее поверхности для M -го цикла, балл;

B_1 – критерий качества идеальной отливки, учитывающий без дефектов, балл;

$k_T, k_M, k_{HP}, k_3, k_B, k_D, k_C$ – коэффициент присутствия соответственно трещин, «мороза», непропрессовки, задира, вырыва, деформации и следов смазки.

Пористость отливки как суммарный критерий качества можно записать в виде выражения, учитывающего важность показателей, суммированных по зонам:

$$y_2(M) = B_2 / (1 + \sum_{j=1}^5 \frac{1}{1 - k_{M,pj}} + \sum_{q=1}^t k_{pq} + \sum_{i=1}^v k_{chl}),$$

где $y_2(M)$ – суммарный критерий качества отливки, учитывающий пористость для M -го цикла, балл;

B_2 – критерий качества идеальной отливки без пор, балл;

$k_{M,pj}, k_{pq}, k_{chl}$ – коэффициенты, характеризующие соответственно место расположения в j -й, размеры в q -й и число пор в l -й зонах отливки; s, t, v – числа зон деления отливки по признакам, характеризующим соответственно место расположения, размеры и число пор.

Применение разработанного критерия наиболее целесообразно при автоматическом контроле качества с использованием ЭВМ.

Реализация представленного подхода опробована на машине ЛПД модели АТ711Б08. Показатель качества отливки A был представлен в виде выражения:

$$A = [1 + \beta_1 F_1 / F_2 + \beta_2 N_1 / N_2 + \beta_3 l_1 / l_2 + \beta_4 l_3 / l_4 + \beta_5 l_5 / l_6 + \beta_6 l_7 / l_8 + \beta_7 V / (mP)]^{-1},$$

где $\beta_1 \dots \beta_7$ – весовые коэффициенты;

F_1, F_2 – соответственно фактическое и заданное значение площади поверхности пор в ответственных местах отливки, м²;

N_1, N_2 – фактическое и заданное значение числа пор;

l_1, l_2 – фактическое и заданное значение размера пор, м;

l_3, l_4 – фактическое и заданное значение отклонения размеров сопрягаемой поверхности, м;

l_5, l_6 – фактическое и заданное значение отклонения размеров несопрягаемой поверхности, м;

l_7, l_8 – фактическое и заданное значение отклонения размеров неответственной поверхности, м;

V – объем отливки, м³;

m – масса отливки, кг;

P – заданное значение пористости отливки, м³/кг.

Значение весовых коэффициентов определяется статистическим исследованием вероятности появления брака из-за отклонения отдельных составляющих показателя качества отливки. При этом принимаем:

$$\sum_{i=1}^7 \beta_i = 10,$$

где i – номер весового коэффициента.

Значение весовых коэффициентов β_i для отливок станины электродвигателя типа АИ71, определенные методом экспертных оценок, соответственно равны: $\beta_1 = 3,4$; $\beta_2 = 2,8$; $\beta_3 = 1,2$; $\beta_4 = 0,4$; $\beta_5 = 0$; $\beta_6 = 0$; $\beta_7 = 2,2$.

Изменения гидродинамических параметров заполнения формы определяется скоростью движения пресс-поршня, изменение которой, в свою очередь, на величину перечисленных дефектов. Это влияние определено в неявном виде, поэтому для управления скоростью движения пресс-поршня целесообразно использовать один из методов экстремального регулирования.

Критерий управления запишем в виде:

$$U = (A_0 - A)^2,$$

где A_0 – заданное значение показателя качества отливки из условия равенства отдельных его составляющих заданным значениям.

Заданная скорость движения пресс-поршня описывается выражением:

$$w_n = w_{(n-1)} - \gamma(U_{(n-1)} - U_{(n-2)}),$$

где $n, n-1, n-2$ – порядковые номера отливок;

γ – коэффициент, определяемый методом активного эксперимента из условий минимального отклонения фактического значения показателя качества отливки от заданного, м/с.

Заданное значение скорости пресс-поршня определяется перед проведением прессования по результатам анализа качества предыдущей отливки.

Для этого отливка, извлеченная манипулятором из литейной формы, помещается в водоохлаждаемую камеру, в которой одновременно измеряется объем отливки по объему вытесненной жидкости, после чего определяется масса детали. Последовательным просвечиванием ответственных мест отливки в рентгеновской установке измеряется площадь пор, их размер и число. Измерение отклонения фактических линейных размеров сопрягаемой, несопрягаемой и неответственной поверхностей отливки от заданных значений производят прибором с электронно-лучевой трубкой.

Так как в начале выполнения программы по производству отливок нового типа или после длительной остановки литейного оборудования отсутствует информация для определения критерия управления U , то для первой отливки в качестве заданной скорости движения пресс-поршня используется ее номинальное значение. Вычисленная заданная скорость движения сравнивается с фактическим значением, измеренным датчиком скорости. По результатам сравнения воздействуют на пропорциональный золотник гидропривода таким образом, чтобы отклонение скорости равнялось нулю.

Оптимальное заполнение металлом пресс-формы обеспечивается его вводом в пресс-камеру с постоянным ускорением и последующей запрессовкой с постоянной скоростью. Путь пресс-поршня можно разбить на несколько характерных участков с соответствующими законами регулирования.

Первый участок $0,03 \dots 0,1$ м определяется движением пресс-поршня до перекрытия заливочного окна. Для предотвращения выплеска металла из окна ускорение на этом участке должно быть небольшим – $0,1 \dots 1$ м/с².

После того, как пресс-поршень перекроет заливочное окно, начинается второй этап запрессовки, на котором необходимо как можно быстрее достигнуть заданной величины скорости пресс-поршня с большим ускорением. Скорость запрессовки – от $0,2$ до 10 м/с, а ускорение – от 1 до 1200 м/с².

По достижении скорости пресс-поршня заданного значения начинается третий участок запрессовки, характеризующийся постоянной скоростью. Процесс регулирования продолжается до окончания заполнения пресс-формы.

Управление скоростью пресс-поршня осуществляется по пройденному пути, скорости пресс-поршня и его ускорению. При этом моменты переключения режимов движения пресс-поршня, отсчет которых ведется от его конечного положения, определяются пройденным путем. При этом расчетное конечное положение и режим ввода металла изменяется в зависимости от массы и физических свойств (температура, вязкость последнего).

Использование описанной модели управления уменьшило возврат отливок на 15 %, увеличило выход годного на $0,4$ % и производительность процесса на 9 %.

ВЫВОДЫ

Приведена математическая модель управления процессом ЛПД с оптимизацией качества получаемых отливок. Модель предусматривает регулирование скорости пресс-поршня по отклонению текущего значения критерия качества от его заданного значения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белоухов А. К. Расчет параметров заполнения дисперсно-турбулентным потоком / А. К. Белоухов, Р. А. Коротков // Автоматизация и прогрессивная технология литья под давлением. – М. : МДНТП, 1984. – С. 95–99.
2. Информационная измерительная система для машин литья под давлением / В. С. Богушевский, Н. А. Сорокин, В. А. Ляшенко и др. // Локальные средства и системы информационного обеспечения АСУТП : сб. науч. тр. – К. : Киевский ин-т автоматики, 1985. – С. 116–122.
3. Тихомиров М. Д. Основы моделирования литейных процессов. Важные особенности систем моделирования / М. Д. Тихомиров // Литейное производство. – 2004. – № 5. – С. 7–11.
4. Информационная технология оперативного дистанционного мониторинга состояний объектов литейного производства / О. И. Шинский, Б. М. Шевчук, В. П. Кравченко, И. О. Шинский // Процессы литья. – 2007. – № 1, 2. – С. 25–28.
5. Моисеев Ю. В. Автоматизация специальных способов литья / Ю. В. Моисеев, А. И. Личак // Процессы литья. – 2008. – № 1. – С. 12–15.
6. Богушевский В. С. АСУ машинами литья под давлением / В. С. Богушевский, Н. А. Сорокин // Автоматизация специальных способов литья : сб. науч. тр. ИПЛ. – К. : АН УССР, ИПЛ, 1987. – С. 8–12.
7. Богушевський В. С. АСКТП комплексу лиття під тиском / В. С. Богушевський // Автоматизація виробничих процесів. – 2001. – № 2 (13). – С. 53–55.