

## Система регулирования температуры пресс-формы на основе нечеткой логики

*В настоящее время литье под давлением (ЛПД) является одним из наиболее распространенных специальных способов изготовления высокоточных отливок из цветных сплавов на основе алюминия, меди, цинка, магния. Основным недостатком ЛПД – высокая себестоимость отливок, которая в значительной степени (до 75 %) определяется затратами на проектирование и изготовление пресс-форм, а также их эксплуатационной стойкостью. Последняя в значительной мере зависит от количества теплосмен и тепловых ударов. Уменьшение количества этих нежелательных явлений достигают регулированием температуры пресс-формы. На практике ЛПД для предварительного разогрева пресс-формы используют газовые горелки и электронагреватели. В последнее время с этой целью все шире используются установки для подогрева и охлаждения формы жидкими теплоносителями. Наиболее важный узел – термостат, связанный с каналами нагрева-охлаждения пресс-формы гибкими соединительными рукавами. При применении термостатов на первый план выдвигается точность регулирования температуры жидкого теплоносителя. Применение нечеткой логики в процессе регулирования температуры пресс-формы дает значительный эффект. Уменьшение брака и увеличение производительности машины литья под давлением.*

**Ключевые слова:** нечеткая логика, система регулирования, литье под давлением

**В**ведение. В настоящее время литье под давлением (ЛПД) является одним из наиболее распространенных специальных способов изготовления высокоточных отливок из цветных сплавов на основе алюминия, меди, цинка, магния. Основным недостатком ЛПД – высокая себестоимость отливок, которая в значительной степени (до 75 %) определяется затратами на проектирование и изготовление пресс-форм, а также их эксплуатационной стойкостью [1]. Последняя в значительной мере зависит от количества теплосмен и тепловых ударов. Уменьшение количества этих нежелательных явлений достигают регулированием температуры пресс-формы. В практике ЛПД для предварительного разогрева пресс-формы используют газовые горелки и электронагреватели. В последнее время с этой целью все шире используются установки для подогрева и охлаждения формы жидкими теплоносителями [2, 3]. Наиболее важный узел – термостат, связанный с каналами нагрева-охлаждения пресс-формы гибкими соединительными рукавами. При применении термостатов на первый план выдвигается точность регулирования температуры жидкого теплоносителя.

Исследования, приведенные в статье, проводились в НТУУ „Киевский политехнический институт” по теме „Математическая модель и система управления машинами литья под давлением”, государственный регистрационный номер 0112U002173.

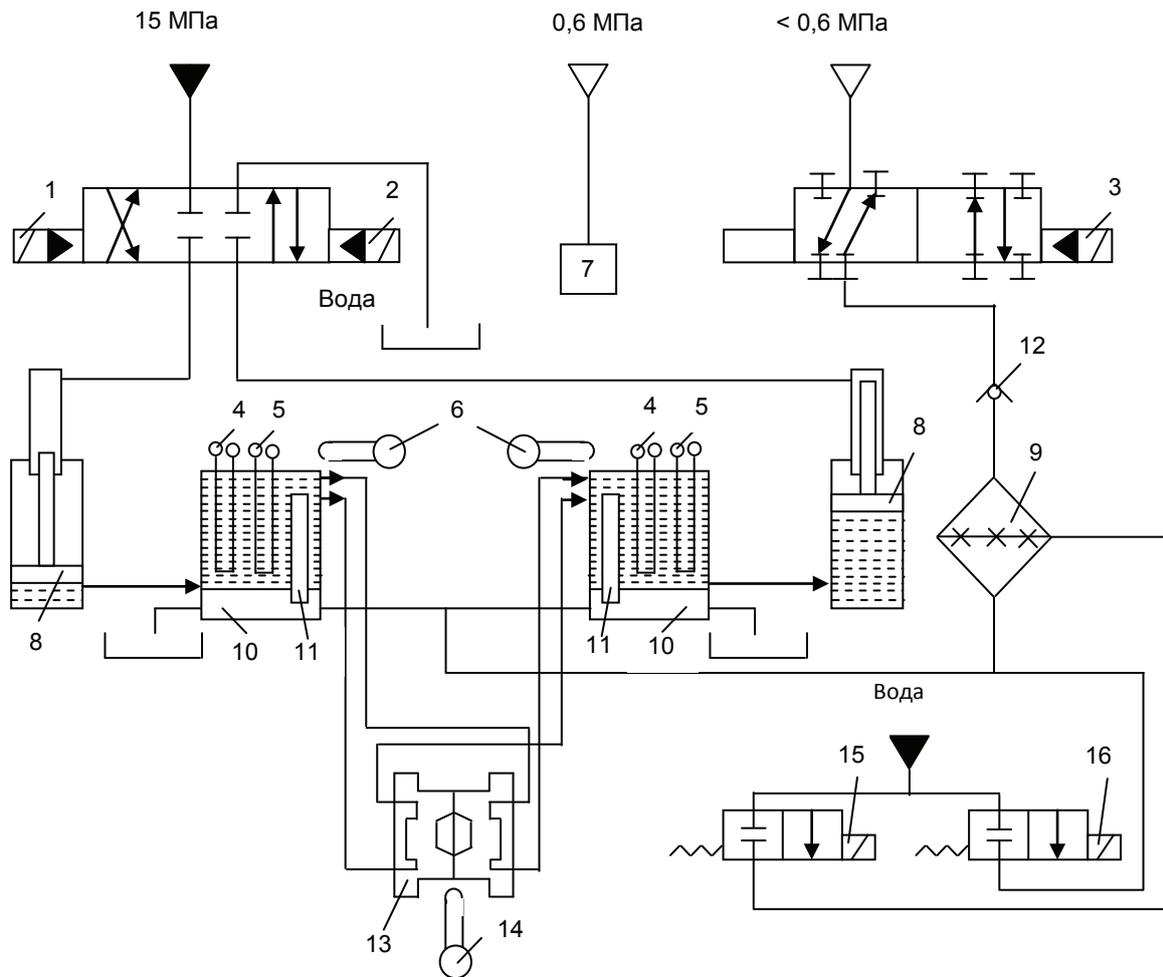
*Цель исследований* – повышение точности термостатирования пресс-формы.

*Материалы и результаты исследований.* Исследования проводились на термостате, представляющим собой теплоизолированный, заполненный теплоносителем бак (рис. 1). Температура пресс-формы регулируется периодическим прокачиванием через теплообменные каналы в полости

пресс-формы 12 высокотемпературной рабочей жидкости. Температура жидкости регулируется в двух теплообменниках 10, каждый из которых находится в режиме нагрева или охлаждения. Теплоноситель перекачивается насосом соответствующего теплообменника. Термостатирующая жидкость до заданной температуры нагревается двумя теплоэлектронагревателями (ТЭН) 4, 5 и контролируется термодарами 6 типа ТХК. Термостат 10 охлаждается водой с помощью тепловых труб 11. Для предотвращения разрушения теплообменника при резком парообразовании хладагента сначала электромагнитами 3 и 15 подается водовоздушная смесь, которая включением электромагнита 16 постепенно переводится на водяной компонент (электромагниты 3 и 15 при этом отключаются). Наличие воздуха в магистрали контролируют с помощью реле давления газа 7. Тепловой режим термостата управляется по показаниям термодара 14, установленной в пресс-форме 13.

На стенках теплообменных каналов постепенно откладываются выделения из термостатирующей жидкости, меняя коэффициент теплопередачи от жидкости к пресс-форме, что приводит к нестационарности процесса регулирования и падению его точности. Нами проведены исследования процесса регулирования нечетким регулятором.

Теплообменник является типичным объектом управления с запаздыванием. Последнее значительно уменьшает быстродействие системы и динамическую точность объекта управления. Передаточная функция такого объекта  $W_o(s) = e^{-sT} G(s)$ . Наиболее эффективным методом борьбы с запаздыванием является охват регулятора звеном обратной связи с передаточной функцией  $W_{oc}(s) = 1 - e^{-sT} G(s)$ . В этом случае передаточная функция замкнутой системы управления имеет вид:



**Рис. 1.** Структурная схема термостатирования пресс-формы: 1, 2, 3, 15, 16 – электромагниты; 4, 5 – ТЭН; 6, 14 – термопары; 7 – реле давления газа; 8 – насос; 9 – смеситель; 10 – теплообменник; 11 – тепловая труба; 12 – обратный клапан; 13 – пресс-форма

$$W_3(s) = \frac{W_p(s)G(s)}{1 + W_p(s)G(s)} e^{-sT}, \quad (1)$$

шагом квантования  $h$ . В качестве первой и второй производной вычисляли первую и вторую разность по формулам:

$$\dot{\theta}(k) = [\theta(k) - \theta(k-1)] / h \quad (3)$$

$$\ddot{\theta}(k) = [\dot{\theta}(k) - \dot{\theta}(k-1)] / h = [\theta(k) - 2\theta(k-1)] / h^2, \quad (4)$$

где  $W_p(s)$  – передаточная функция регулятора.

Если синтезировать регулятор для объекта без запаздывания  $G(s)$ , то при наличии запаздывания качество переходного процесса не изменится, а происходит лишь смещение выходной переменной системы на время запаздывания  $T$ . Звено запаздывания с передаточной функцией  $e^{-sT}$  при моделировании реализуем приближением Паде первого порядка:

$$e^{-sT} \approx \frac{2 - Ts}{2 + Ts}. \quad (2)$$

где  $\theta(k)$  – квантованная ошибка на выходе АЦП.

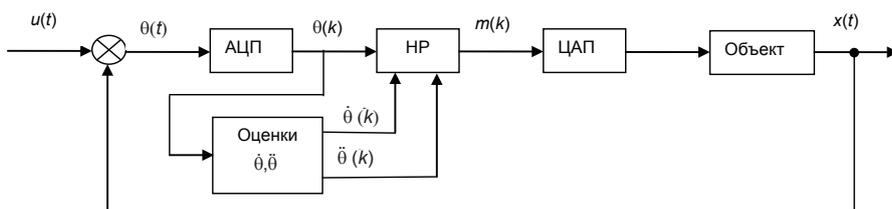
ЦАП представляет собой фиксатор нулевого порядка с передаточной функцией:

$$W(s) = (1 - e^{-sT}) / s.$$

При решении задачи синтеза нечеткого регулятора принимаем число термов, с помощью которого

Применяем стандартную схему системы управления с нечетким регулятором (НР) [4] (рис. 2).

НР реализуется на микропроцессоре и работает в дискретном режиме. Поэтому система автоматического управления с НР содержит устройства связи с объектом – АЦП и ЦАП. АЦП квантует непрерывную ошибку  $\theta(t) = u(t) - x(t)$  с



**Рис. 2.** Схема управления с цифровым регулятором: АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь

оцениваются лингвистические переменные (входные и выходной параметр НР) ошибки системы в регулировании температуры  $\theta$ , скорость изменения (первая производная) ошибки  $\dot{\theta}$ , ускорение (вторая производная) ошибки  $\ddot{\theta}$ , управляющее воздействие на объект  $m$ , равным 3. Установим диапазоны изменения лингвистических переменных равным  $[\theta_{\min}, \theta_{\max}]$ ,  $[\dot{\theta}_{\min}, \dot{\theta}_{\max}]$  и  $[m_{\min}, m_{\max}]$ . Пересчет значения каждой лингвистической переменной  $x_i$ ,  $i = \overline{1, n}$ ,  $n = 4$  в соответствующий элемент управления  $u^* \in [0, 1]$  определяется выражением

$$u_i^* = (x_i^* - x_{ni}) / (x_{ei} - x_{ni}), \quad (5)$$

на основании которого находим:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_1^* = (\theta^* - \theta_{\min}) / (\theta_{\max} - \theta_{\min}); \\ u_2^* = (\dot{\theta}^* - \dot{\theta}_{\min}) / (\dot{\theta}_{\max} - \dot{\theta}_{\min}); \\ u_3^* = (\ddot{\theta}^* - \ddot{\theta}_{\min}) / (\ddot{\theta}_{\max} - \ddot{\theta}_{\min}); \\ u_c^* = (m^* - m_{\min}) / (m_{\max} - m_{\min}) \end{array} \right. \quad (6)$$

$$u_c^* = (m^* - m_{\min}) / (m_{\max} - m_{\min}) \quad (7)$$

При задании функций принадлежности (ФП) треугольной формы на едином универсальном множестве  $U = [0, 1]$  получаем следующие аналитические выражения для каждой лингвистической величины:

$$\mu_1(u) = 1 - u, u \in [0, u]; \quad \mu_2(u) = u, u \in [0, 1];$$

$$\mu_3(u) = \begin{cases} 2u, u \in [0, 1/2]; \\ 2(1-u), u \in [1/2, 1]. \end{cases} \quad (8)$$

При поступлении на НР значений входных переменных  $\theta$ ,  $\dot{\theta}$ ,  $\ddot{\theta}$  с шагом квантования  $h$  осуществляется расчет величин  $u_1^*$ ,  $u_2^*$  и  $u_3^*$  по формулам (6) и ФП  $\mu^j(u)$ ,  $j = \overline{1, 3}$ , по формулам (8).

Лингвистическое правило управления представим в виде:

$$\text{если } (\theta^* = a_1^j) \text{ и } (\dot{\theta}^* = a_2^j) \text{ и } (\ddot{\theta}^* = a_3^j),$$

$$\text{то } (m^* = a_c^j), j = \overline{1, 3} \quad (9)$$

где  $a_1^j$ ,  $a_2^j$ ,  $a_3^j$  – лингвистические оценки ошибки ее первой и второй производной, рассматриваемые как нечеткие множества, определенные на универсальном множестве,  $j = \overline{1, 3}$ ;  $a_c^j$  – лингвистические оценки управляющего воздействия на объект, выбираемые из термножества переменной  $m$ . Лингвистические оценки выбираются из термножества лингвистических переменных  $\theta$ ,  $\dot{\theta}$ ,  $\ddot{\theta}$  и  $m$ :  $a_c^j \in$  [отрицательная ( $j = 1$ ), положительная ( $j = 2$ ), близкая к нулю-нулевая ( $j = 3$ )].

При попадании жидкого металла в литейную форму последняя нагревается, причем толщина слоя от

рабочей поверхности формы, в котором возникает значительный температурный градиент составляет около 30 мм [5]. Среднюю температуру пограничного слоя контролируют с помощью термопары, горячий спай которой устанавливают на глубине, равной половине пограничного слоя. Таким образом, можно считать, что избыточная энтальпия литейной формы вследствие нагрева отливкой сосредоточена в некоторой приведенной массе:

$$m_{\phi}^{\text{пр}} = K m_{\phi}, \quad (10)$$

где  $K$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от массы формы и равный 0,10-0,14;  $m_{\phi}$  – масса литейной формы, кг.

Избыточную энтальпию литейной формы можно выразить как

$$\Delta Q = c_{\phi} m_{\phi}^{\text{пр}} (t_{\phi} - t_3), \quad (11)$$

где  $\Delta Q$  – избыточная энтальпия литейной формы, Дж;  $c_{\phi}$  – средняя удельная теплоемкость литейной формы, Дж/(кг · °С);  $t_{\phi}$  – температура литейной формы по показаниям термопары в момент извлечения отливки, °С;  $t_3$  – заданная температура литейной формы, °С.

Для рабочего диапазона температур (150-300 °С) средняя удельная теплоемкость литейной формы составляет 500 Дж/(кг · °С).

Избыточная энтальпия литейной формы компенсируется охлаждением с помощью теплоносителя и тепловых потерь в окружающую среду согласно выражения

$$\Delta Q = \int_{(\tau)} c_{\tau} (t_2 - t_1) V_{\tau} d\tau + q \tau_{\text{ц}}, \quad (12)$$

где  $c_{\tau}$  – средняя удельная теплоемкость теплоносителя, Дж/(м³ · °С);  $t_2$  и  $t_1$  – температура теплоносителя соответственно на выходе и входе полости теплообмена литейной формы, °С;  $\tau$  – текущее время, с;  $q$  – тепловой поток в окружающую среду, зависящий от конструкции литейной формы и составляющий 10-20 кВт;  $\tau_0$  – продолжительность цикла изготовления отливки, с.

Средняя удельная теплоемкость теплоносителя может быть определена как

$$c_{\tau} = (c_0 [1 + 0,5\alpha(t_1 + t_2)]), \quad (13)$$

где  $c_0$  – удельная теплоемкость теплоносителя при 0 °С, Дж/(кг · °С);  $\alpha$  – температурный коэффициент, °С<sup>-1</sup>.

При использовании в качестве теплоносителя масла значения  $c_0 = 1785$  кДж/(м³ · °С) и  $\alpha = 0,74 \cdot 10^{-3}$  °С<sup>-1</sup>.

Из соотношений (11-13) получаем:

$$c_{\phi} m_{\phi}^{\text{пр}} (t_{\phi} - t_3) - q \tau_{\text{ц}} =$$

$$= \int_{(\tau)} c_0 [1 + 0,5\alpha(t_1 + t_2)] (t_2 - t_1) V_{\tau} d\tau. \quad (14)$$

Равенство правой и левой частей выражения (14) определяется продолжительностью подачи теплоносителя. Таким образом, подачу теплоносителя необходимо прекратить в момент достижения равенства выражения (14).

Выражение (14) также используется для регулирования продолжительности подачи теплоносителя для нагрева литейной формы. В этом случае обе части выражения (14) будут меньше нуля.

Замкнутая система автоматического управления «регулятор + объект управления» имеет вид согласно рис. 3. Синтез НР выполнен по формулам (1-9) для треугольных функций принадлежности с шагом квантования  $h = 0,1$  с. Ошибка на выходе АЦП  $\theta(k)$ , ее первая  $\dot{\theta}(k) = [\theta(k) - \theta(k-1)]/h$  и вторая  $\ddot{\theta}(k) = [\dot{\theta}(k) - \dot{\theta}(k-1)]/h$  разности подаются на вход НР. Сигнал с выхода НР поступает на ЦАП (фиксатор нулевого порядка с передаточной функцией  $H(s) = (1 - e^{-hs})/s$ ) и далее в непрерывную часть системы (теплообменник + пресс-форма).

Система регулирования выполнена на стандартных средствах измерения и регулирующем микроконтроллере. В качестве датчиков температуры применены датчики системы Метран-270МП [6], датчиков

давления и расхода – датчики системы Метран-100, датчики извлечения отливки и наличия металла в пресс-форме выполнены на базе бесконтактного датчика положения типа БК. Блоки управления охлаждением и нагревом представляют собой усилители, преобразующие единичный выходной сигнал контроллера в напряжения  $\sim 110$  В для включения соответственно электромагнитного клапана магистрали охлаждающей воды и магнитного пускателя, управляющего нагревом теплоносителя.

Применение системы регулирования температуры литейной формы на базе НР уменьшает брак на 1,5 % (соответственно снижается возврат), увеличивает производительность машины ЛПД на 2 % и повышает стойкость пресс-формы на 0,5 %.

## Выводы

Регулирование температуры пресс-формы позволяет существенно уменьшить количество тепловых ударов на ее рабочей поверхности, что повышает продолжительность эксплуатации пресс-формы.

Введение в систему НР повышает качество регулирования и уменьшает энергопотребление процесса ЛПД.

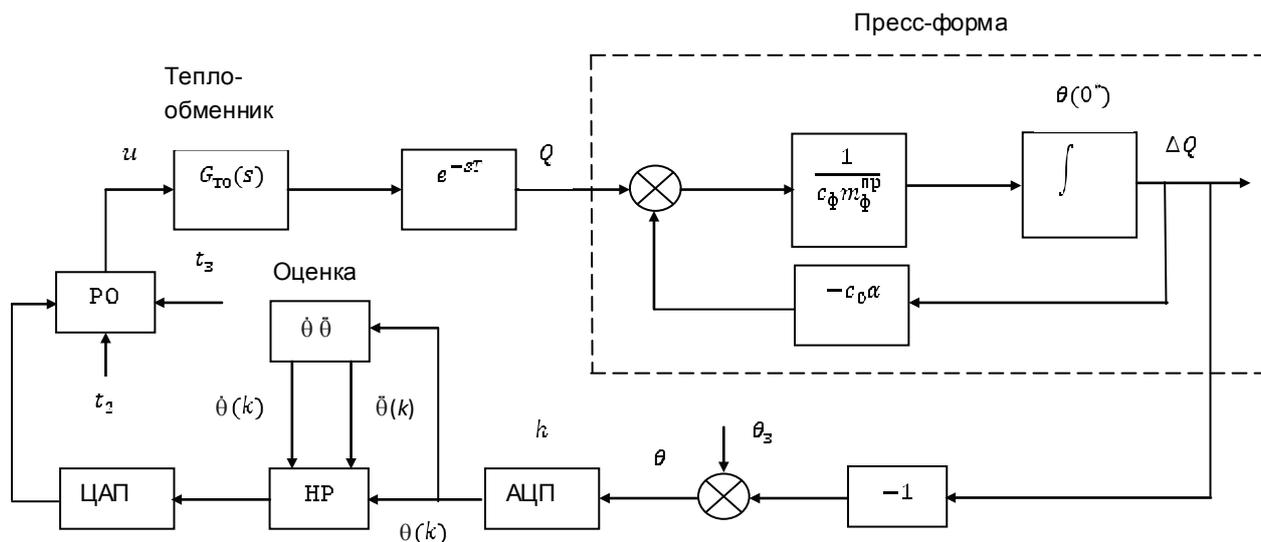
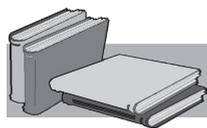


Рис. 3. Замкнутая система автоматического управления



## ЛИТЕРАТУРА

1. Повышение эффективности литья под давлением (ЛПД) / А. А. Жуков, А. Д. Постнова, В. А. Борисов и др. // Литейщик России. – 2008. – № 1. – С. 25-30.
2. АСУТП машин литья под давлением / В. С. Богушевский, В. Н. Иванов, Н. А. Рюмшин, Н. А. Сорокин. – К.: НПК «Киевский институт автоматики», 1994. – 239 с.
3. Богушевський В. С. АСКТП комплексу лиття під тиском // Автоматизація виробничих процесів. – 2001. – № 2 (13). – С. 53-55.
4. Богушевський В. С., Зубова К. М. Управління конвертерною плавкою в режимі енергозбереження // Науково-технічна інформація. – 2013. – № 1 (55). – С. 52-56.
5. Богушевський В. С., Антоневич Я. К. Тепловая работа пресс-формы машины литья под давлением // Металл и литье Украины. – 2012. – № 6. – С. 7-9.
6. www.metran.ru. Интеллектуальные датчики.

## Анотація

Богушевський В. С., Самарай Р. В.

## Система регулювання температури прес-форми на основі нечіткої логіки

В даний час лиття під тиском ( ЛПТ ) є одним з найбільш розповсюджених спеціальних способів виготовлення високоточних виливків з кольорових сплавів на основі алюмінію, міді, цинку, магнію. Основний недолік ЛПТ – висока собівартість виливків, яка значною мірою (до 75 %) визначається витратами на проектування та виготовлення прес-форм, а також їх експлуатаційною стійкістю. Остання значною мірою залежить від кількості теплосмін і теплових ударів. Зменшення кількості цих небажаних явищ досягають регулюванням температури прес-форми. У практиці ЛПТ для попереднього розігріву прес-форми використовують газові пальники та електронагрівачі. Останнім часом з цією метою все ширше використовуються установки для підігріву та охолодження форми рідкими теплоносіями. Найбільш важливий вузол – термостат, пов'язаний з каналами нагріву-охолодження прес-форми гнучкими сполучними рукавами. При застосуванні термостатів на перший план висувається точність регулювання температури рідкого теплоносія. Застосування нечіткої логіки в процесі регулювання температури прес-форми дає значний ефект. Зменшення браку та збільшення продуктивності машини лиття під тиском.

## Ключові слова

нечітка логіка, система регулювання, лиття під тиском

## Summary

*Bogushevsky V.S., Samaray R.V.*

## A temperature control system of mold based on fuzzy logic

Currently, injection molding ( IMM ) is one of the most common methods of manufacturing special casting precision of ferrous alloys based on aluminum, copper, zinc and magnesium . The main drawback of the IMM is the high cost of castings, which is largely ( 75% ) is determined by the cost of design and manufacture of molds, as well as their operational stability. Last largely depends on the number of thermal cycles and thermal shock. Reducing the number of these adverse events is achieved by adjusting the temperature of the mold. In practice, the IMM to preheat the mold use gas burners and electric heaters. Recently for this purpose have been increasingly used installations for heating and cooling heat transfer by liquid form. The most important junction is thermostat associated with the heating-cooling channels mold by flexible connection sleeves. In applying thermostats to the fore precisions is temperature control liquid coolant. Application of fuzzy logic in the process of temperature regulating of the mold gives significant effect. Reducing of flow and increase performance molding machine under pressure.

## Keywords

fuzzy logic, control system, injection molding

Поступила 10.03.14

Телефон редакції журналів  
«Металл и литье Украины» и «Процессы литья»  
(044) 424-04-10