

**В.М. ТОНКОНОГИЙ**, д-р техн. наук,  
**В.Д. ГОГУНСКИЙ**, д-р техн. наук,  
**И.И. СТАНОВСКАЯ**, Одесса, Украина

## **ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЯ О ВЫБОРЕ СПОСОБА ЛИТЬЯ В НЕЧЕТКИХ УСЛОВИЯХ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

Запропонована методика визначення доцільності вибору способу лиття для конкретного виливка, що дозволяє робити відбір техпроцесу, який забезпечить добру якість виливків і принесе прибуток як ливарному підприємству, так і підприємствам, що виготовляють литі деталі та експлуатують обладнання, куди вони входять як складові частини.

Предложена методика определения целесообразности выбора способа литья для конкретной отливки, позволяющая производить отбор техпроцесса, который обеспечит хорошее качество отливок и принесет прибыль как литейному предприятию, так и предприятиям, изготавливающим литые детали и эксплуатирующим оборудование, куда они входят в качестве составных частей.

The technique of the molding mode choice expediency definition for the concrete casting is offered, allowing to make takeoff of technical process which will provide high quality moulds and the profit both to the foundry enterprise, and the enterprises making cast details and maintaining the equipment where they enter as components will make.

Технологическая подготовка современного литейного производства предполагает на самых ранних (а значит, и наиболее ответственных!) стадиях принятие решения о целесообразности выбора способа литья, которых в настоящее время насчитывается более ста [1]. Конечно, возможности конкретного предприятия чаще всего ограничиваются тремя – пятью способами, но и в этих условиях выбор представляет определенные трудности и предполагает большую ответственность технолога. Автоматизация на этом этапе связана с решением задачи при весьма нечетких исходных данных, связанных, как с весьма приблизительными, «лингвистическими» характеристиками будущего производства, так и с крайней нечеткостью самих понятий «целесообразность» и «нецелесообразность» [2, 3].

Рассмотрим процесс принятия решения о целесообразности выбора конкретного способа литья, как решение уравнения:

$$y = f_y(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (1)$$

где  $y$  – некоторая выходная переменная, однозначно определяющая принятое решение;  $x_1, x_2, \dots, x_n$  – входные переменные, на основании которых, собственно, и базируется решение.

Для качественных переменных  $x_i \div x_n$  и  $y$  предполагается, что известны множества всех возможных значений:

$$U_i = \{v_i^1, v_i^2, \dots, v_i^{q_i}\}, \quad i = \overline{1, n}; \quad (2)$$

$$Y = \{y^1, y^2, \dots, y^{q_m}\}, \quad (3)$$

где  $v_i^1(v_i^{q_i})$  – балльная оценка, соответствующая наименьшему (наибольшему) значению входной переменной  $x_i$ ;  $y^1(y^{q_m})$  – балльная оценка, соответствующая наименьшему (наибольшему) значению выходной переменной  $y$ ;  $q_i, \quad i = \overline{1, n}$  и  $q_m$  – мощности множеств (2) и (3) [4].

Рассмотрим простой пример. Пусть выбор осуществляется из трех вариантов при наличии пяти исходных лингвистических показателей. В этом случае фаззификация переменных позволила получить следующие лингвистические оценки и необходимые для их формализации функции принадлежности.

Во множестве из  $n$  переменных, принимаемых во внимание при принятии решения о целесообразности покрытия, пять можно отнести к лингвистическим качественным:  $x_1$  – тип производства;  $x_2$  – требования к точности и качеству поверхности;  $x_3$  – материал отливки;  $x_4$  – конфигурация отливки;  $x_5$  – габарит отливки. В нашем случае  $n = 5$ , и другие параметры при выборе не рассматриваются. Выходная переменная  $y$  соответствует принятию решения о целесообразности выбора того или иного способа литья из трех доступных в конкретном производстве.

Для оценки лингвистических переменных  $x_i, \quad i = \overline{1, 5}$  и  $y$  используются качественные термы из следующих терм-множеств:

$$A_i = \{a_i^1, a_i^2, \dots, a_i^{l_i}\} \text{ – терм-множество переменной } x_i, \quad i = \overline{1, 5};$$

$$D = \{d_1, d_2, \dots, d_m\} \text{ – терм-множество переменной } y,$$

где  $a_i^p$  –  $p$ -й лингвистический терм переменной  $x_i$ ;  $p = \overline{1, l_i}, \quad i = \overline{1, n}$ ;  $d_j$  –  $j$ -й лингвистический терм переменной  $y$ ;  $m$  – количество различных решений в рассматриваемой области. Предложены следующие терм-множества:

$$\begin{aligned}
A_1 &= \{a_1^1 - \text{массовое (М)}, a_1^2 - \text{крупносерийное (К)}, a_1^3 - \text{серийное (С)}, \\
&\quad a_1^4 - \text{индивидуальное (И)}\}; \\
A_2 &= \{a_2^1 - \text{низкие (Н)}, a_2^2 - \text{средние (С)}, a_2^3 - \text{высокие (В)}, \\
&\quad a_2^4 - \text{прецизионные (П)}\}; \\
A_3 &= \{a_3^1 - \text{сталь (С)}, a_3^2 - \text{чугун (Ч)}, a_3^3 - \text{бронза (Б)}, a_3^4 - \text{алюминий (А)}\}; \\
A_4 &= \{a_4^1 - \text{простая (П)}, a_4^2 - \text{средняя (С)}, a_4^3 - \text{сложная (Ж)}, \\
&\quad a_4^4 - \text{очень сложная (Ч)}\}; \\
A_5 &= \{a_5^1 - \text{мелкие (М)}, a_5^2 - \text{средние (С)}, a_5^3 - \text{крупные (К)}\}; \\
D &= \{d_1 - \text{песчано-глинистые формы}, d_2 - \text{песчано-смоляные формы}, \\
&\quad d_3 - \text{кокиль}\}.
\end{aligned}$$

Как известно [4], в случае качественных лингвистических переменных  $x_i$  и  $y$  нечеткие множества  $a_i^p$  и  $d_j$  определяются так:

$$a_i^p = \sum_{k=1}^{q_i} \mu^{a_i^p}(v_i^k) / v_i^k; \quad d_j = \sum_{r=1}^{q_m} \mu^{d_j}(y^r) / y^r, \quad (4)$$

где  $\mu^{a_i^p}(v_i^k)$  – степень принадлежности элемента  $v_i^k \in U_i$  терму  $a_i^p \in A_i$ ,  $p = \overline{1, l_i}, i = \overline{1, n}, k = \overline{1, q_i}$ ;  $\mu^{d_j}(y^r)$  – степень принадлежности элемента  $y^r \in Y$  терму-решению  $d_j \in D$ ;  $j = \overline{1, m}$ ;  $U_i$  и  $Y$  определяются соотношениями (2) и (3). В соотношениях (4) знаки суммы обозначают объединение пар  $\mu(u) / u$ . Для построения нечеткой базы знаний, необходимой для решения уравнения (1), выполнена экспертная оценка комбинаций значений входных переменных с одновременной оценкой функции принадлежности  $\mu^{a_i^p}(x_i)$ .

Результаты оценки сведены в матрицу знаний, фрагмент которой приведен в таблице.

Размерность матрицы равна  $(n+1) \times N$ , где  $(n+1)$  – количество столбцов, а  $N = k_1 + k_2$  – количество строк; первые 5 столбцов матрицы соответствуют входным переменным  $x_i$ ; а 6-й столбец соответствует значениям  $d_j$  выходной переменной  $y_j, j = \overline{1, 2}$ .

Каждая строка матрицы представляет некоторую комбинацию значений входных переменных, отнесенную экспертом к одному из возможных значений выходной переменной  $y$ . Матрица знаний определяет нечеткую базу знаний в виде системы логических высказываний типа «ЕСЛИ-

ТО, ИНАЧЕ», связывающих значения входных переменных  $x_1 - x_n$  с одним из возможных типов решения  $d_j, j = \overline{1, m}$ :

Фрагмент матрицы знаний

Номер комбинации входных переменных	Входные переменные					Выходная переменная (способ литья)
	Тип производства	Точность и качество поверхности	Материал отливки	Конфигурация отливки	Габарит отливки	
1.1	К	Н	С	С	С	песчано-глинистые формы
1.2	С	С	Ч	П	С	
1.3	С	С	Ч	С	М	
1.4	К	С	С	П	С	
1.5	И	С	Ч	С	К	
...						
2.1	К	В	С	П	М	песчано-смоляные формы
2.2	С	С	С	С	М	
2.3	С	В	Б	Ж	С	
2.4	К	В	С	С	М	
2.5	С	В	Б	П	М	
...						
3.1	М	П	А	С	М	кокиль
3.2	М	П	А	С	С	
3.3	К	В	Б	П	М	
3.4	М	В	А	С	М	
3.5	К	П	А	С	С	
...						

где  $d_j (j = \overline{1, 2})$  – лингвистическая оценка выходной переменной  $y$ , определяемая из терм-множества  $D$ ;

$a_i^{jp}$  – лингвистическая оценка входной переменной  $x_i$  в  $p$ -й строке  $j$ -й дизъюнкции, выбираемая из соответствующего терм-множества  $A_i, i = \overline{1, 5}; j = \overline{1, 2}; p = \overline{1, k_j}$ ;

$k_j$  – количество правил, определяющих значение выходной переменной  $y = d_j$ .

База знаний может быть представлена в виде уравнения:

$$\bigcup_{p=1}^{k_j} \left[ \bigcap_{i=1}^n (x_i = a_i^{jp}) \right] \rightarrow y = d_j, j = \overline{1, 2}. \quad (5)$$

Таким образом, искомое соотношение (1), устанавливающее связь между входными параметрами  $x_i$  и выходной переменной  $y$ , формализовано в виде системы нечетких логических высказываний, которая базируется на приведенной матрице знаний (табл.) [2].

Функция принадлежности  $\mu^T(x)$  характеризует субъективную меру (в диапазоне  $[0,1]$ ) уверенности эксперта в том, что четкое значение  $x$  соответствует нечеткому терму  $T$ .

Будем считать известными множество решений  $D = \{d_1, d_2\}$ , соответствующих выходной переменной  $y$ , множество входных переменных  $X = (x_1, x_2, \dots, x_5)$ , функции принадлежности, позволяющие представлять переменные  $x_i, i = \overline{1, 5}$  в виде нечетких множеств, а также матрицу знаний.

Для разработки алгоритма принятия решения, позволяющего фиксированному вектору входных переменных  $X^* = \langle x_1^*, x_2^*, \dots, x_5^* \rangle, x_i^* \in [\underline{x}_i, \overline{x}_i]$  поставить в соответствие решение  $y \in D$ , строим систему нечетких логических уравнений на базе матрицы знаний или изоморфной ей базе знаний и вычисляем значения функций принадлежности различных решений при фиксированных значениях входных переменных объекта. В качестве искомого решения выбирается решение с наибольшим значением функции принадлежности.

Пусть  $\mu^{a_i^{jp}}(x_i)$  – функция принадлежности параметра  $x_i \in [\underline{x}_i, \overline{x}_i], i = \overline{1, 5}$  нечеткому терму  $a_i^{jp}; i = \overline{1, 5}; j = \overline{1, 2}; p = \overline{1, k_j}; \mu^{d_j}(x_1, x_2, \dots, x_n)$  – зависящая от 5 переменных функция принадлежности вектора входных переменных  $X = (x_1, x_2, \dots, x_5)$  значению выходной переменной  $y = d_j; j = \overline{1, 2}$ .

Связь между этими функциями определяется нечеткой базой знаний и может быть представлена в виде следующих уравнений:

$$\begin{aligned} \mu^{d_1}(x_1, x_2, \dots, x_5) &= \mu^{a_1^{11}}(x_1) \wedge \mu^{a_2^{11}}(x_2) \wedge \dots \wedge \mu^{a_5^{11}}(x_5) \vee \\ &\dots \vee \\ &\vee \mu^{a_1^{11}}(x_1) \wedge \mu^{a_2^{11}}(x_2) \wedge \dots \wedge \mu^{a_5^{11}}(x_5); \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \mu^{d_2}(x_1, x_2, \dots, x_5) &= \mu^{a_1^{11}}(x_1) \wedge \mu^{a_2^{11}}(x_2) \wedge \dots \wedge \mu^{a_5^{11}}(x_5) \vee \\ &\dots \vee \\ &\vee \mu^{a_1^{11}}(x_1) \wedge \mu^{a_2^{11}}(x_2) \wedge \dots \wedge \mu^{a_5^{11}}(x_5). \end{aligned} \quad (7)$$

Эти нечеткие логические уравнения получены из нечеткой базы знаний путем замены лингвистических термов  $a_i^{jp}$  и  $d_j$  на соответствующие функции принадлежности, а операций  $\cap$  и  $\cup$  на операции  $\wedge$  и  $\vee$ .

Принятие решения  $d^* \in D = \{d_1, d_2\}$ , которое соответствует вектору фиксированных значений входных переменных  $X^* = \langle x_1^*, x_2^*, \dots, x_5^* \rangle$  осуществляется в соответствии со следующим алгоритмом.

Шаг 1. Фиксируется вектор значений входных переменных  $X^*$ .

Шаг 2. Задается функция принадлежности нечетких термов, используемых в нечеткой базе знаний и определяются значения этих функций для заданных значений входных переменных  $x_1^* - x_5^*$ .

Шаг 3. С использованием логических уравнений (6) и (7) вычисляются многомерные функции принадлежности  $\mu^{d_j}(x_1^*, x_2^*, \dots, x_5^*)$  вектора  $X^*$  для всех значений  $d_j \in D$ ;  $j = \overline{1, 2}$  выходной переменной  $y$ . При этом логические операции И ( $\wedge$ ) и ИЛИ ( $\vee$ ) над функциями принадлежности заменяются на операции  $\min$  и  $\max$ :

$$\mu(a) \wedge \mu(b) = \min[\mu(a), \mu(b)]; \quad (8)$$

$$\mu(a) \vee \mu(b) = \max[\mu(a), \mu(b)]. \quad (9)$$

Шаг 4. Определяется значение  $d_j^*$ , функция которого максимальна:

$$\mu^{d_j^*}(x_1^*, x_2^*, \dots, x_5^*) = \max_{j=1,2} (\mu^{d_j}(x_1^*, x_2^*, \dots, x_5^*)). \quad (10)$$

Это и будет искомым решением для вектора значений входных переменных  $X^* = \langle x_1^*, x_2^*, \dots, x_5^* \rangle$ .

Таким образом, предложенный алгоритм использует идею идентификации лингвистического термина по максимуму функции принадлежности и обобщает эту идею на всю матрицу знаний [2].

Вычислительная часть предложенного алгоритма реализована на матрице значений функций принадлежности, полученной из матрицы знаний путем выполнения операций  $\min$  и  $\max$ . Для получения достоверных результатов особое внимание уделяли формированию матрицы знаний, которая играет главную роль в определении целесообразности выбора конкретного способа литья. В данном случае при формировании матрицы знаний были проанализированы результаты лабораторных и производственных испытаний более 150 различных видов и типоразмеров отливок, произведенных на 12 предприятиях.

**Список литературы:** 1. Специальные способы литья: Справочник / В.А. Ефимов, Г.А. Анисович, В.Н. Бабич и др. – М.: Машиностроение, 1991. – 436 с. 2. Становский А.Л. Интеллектуальная поддержка принятия решений при инструментальном обеспечении производства / А.Л. Становский, В.М. Тонконогий, О.Е. Плачинда // Материалы Четвертой ежегодной Промышленной конференции «Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях». – Славское: УИЦ «Наука. Техника. Технология», 2004. – С. 207 – 210. 3. Налева Г.В. Проблема прийняття рішення при управлінні економікою підприємства / Г.В. Налева, В.М. Тонконогий, О.Л. Становський // Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні проблеми економіки підприємства». – Том 1. – Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2003. – С. 86 – 88. 4. Ротштейн А.П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткие множества, генетические алгоритмы, нейронные сети. – Винница: УНИВЕРСУМ-Винница, 1999. – 320 с.