



*In the article there is given analysis of the methods, used for technological diagnostics of foundry processes, and also given the effective algorithm of solution of the main problems of foundry technological processes diagnostics, realized computer-assisted.*

С. Г. ПЕЛЫХ, О. И. ПОНОМАРЕНКО,  
Национальный технический университет  
"Харьковский политехнический институт",  
А. А. РАДЧЕНКО, ОАО "Харьковский тракторный завод"

## ДИАГНОСТИКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОТЛИВОК

УДК 621.74 (083) : 681.32.06

Производство высококачественных отливок включает в себя два вида процессов: материально-энергетические, обеспечивающие реализацию технологического процесса, и информационные, направленные на их совершенствование. Если в настоящее время в сфере первого из этих процессов достигнуты большие успехи, результатом которых являются классические и новые технологии литья, то в области организации информационных процессов господствует малоэффективный эмпирический подход с хаотическим использованием элементов компьютерных информационных технологий.

Для решения задач технологической диагностики процессов литья могут быть использованы методы классического многомерного статического анализа, дискриминантный анализ и многомерная классификация. Из большого многообразия методов и алгоритмов, разработанных в рамках перечисленных подходов, необходимо отобрать и опробовать наиболее простые и эффективные.

На основе использования перечисленных подходов были разработаны алгоритмы для решения задачи диагностики технологических процессов изготовления отливок. Их практическое опробование позволило выявить следующее. Во-первых, применение математических методов диагностики имеет смысл только в том случае, если обрабатываемая информация достаточно полная и точная. Во-вторых, испытания различных предложенных к настоящему моменту критериев степени тесноты статистической связи для определения силы влияния переменных технологического плана на параметры качества отливок показали, что эффективной и универсальной характеристикой является

коэффициент детерминации. Все остальные характеристики, такие, как канонические парные, частные, множественные коэффициенты корреляции, корреляционное отношение и др., представляют собой частные версии коэффициента детерминации, реализованные в рамках различных частных схем зависимостей.

Алгоритм решения задачи диагностики технологических процессов изготовления отливок направлен на решение следующих задач.

1. Определение степени влияния отдельных переменных технологического характера на параметры качества отливок.
2. Отбор комплекса переменных, определяющих уровень качества отливок.
3. Прогноз и управление параметрами качества отливок на стадии реализации технологического процесса.
4. Изучение причин появления литейных дефектов.
5. Разработка и корректировка технических условий на технологический процесс изготовления отливки.

Таблица исходных данных для обработки приведена ниже.

Однако для решения всех задач технологической диагностики необходимо сформировать не одну, а две таблицы исходных данных (ТД), имеющие в принципе одну и ту же форму, но различный характер. В таблице исходных данных первого рода (ТД-1) каждая строка представляет собой результат реализации технологического процесса изготовления отливок за определенный период времени. В качестве независимых переменных в этом случае выступают средние уровни независи-

Номер отливки	Класс сложности	Масса	$x_1$	$x_2$	...	$x_m$	$y_1$	$y_2$	...	$y_k$
1	$K_{C1}$	$m_1$	$x_{11}$	$x_{12}$	...	$x_{1m}$	$y_{11}$	$y_{12}$	...	$y_{1k}$
2	$K_{C2}$	$m_2$	$x_{21}$	$x_{22}$	...	$x_{2m}$	$y_{21}$	$y_{22}$	...	$y_{2k}$
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
$N$	$K_{CN}$	$m_N$	$x_{N1}$	$x_{N2}$	...	$x_{Nm}$	$y_{N1}$	$y_{N2}$	...	$y_{Nk}$

мых переменных и их дисперсии, характеризующие разброс соответствующих параметров за изучаемый дискретный отрезок времени, а в качестве значений  $y_j$  — количественные характеристики, отражающие уровень качества отливок за этот же отрезок времени. В качестве параметров  $y_j$  в частном случае могут быть использованы данные о количестве, доле или интенсивности проявления литейных дефектов. В математическом плане все данные этой таблицы представляются в виде числа.

Таблица исходных данных второго рода (ТД-2) отличается от первой тем, что ее строки представляют собой результаты конкретной реализации технологического процесса применительно к изготовлению одной отливки. Переменные  $x_i$  — это значения технологических переменных в данной конкретной реализации технологического процесса, а значения переменной  $y_j$  могут принимать не арифметические, а логические значения, т. е.  $y_j=1$ , если в отливке имеется  $j$ -й дефект и  $y_j=0$ , если он отсутствует.

Для решения задач технологической диагностики оказалось достаточно двух алгоритмов. Первый из них предназначен для решения первых трех задач из пяти решаемых и заключается в последовательном выполнении следующих основных этапов.

1. Из таблицы исходных данных первого рода ТД-1 формируем стандартную матрицу независимых переменных и результатов эксперимента.

2. Определяем общий вид искомой математической зависимости между параметрами качества и независимыми переменными (линейная, квадратичная, экспоненциальная и т. д.) в каждой конкретной решаемой задаче:

$$y = f(\bar{x}, \bar{B}), \quad (1)$$

где  $\bar{x}$  и  $\bar{B}$  — соответственно векторы независимых переменных и искомых коэффициентов математической модели.

3. Определяем одним из численных методов значения искомых коэффициентов  $b_j$ .

4. Определяем дисперсию невязок для построенной математической модели, содержащей  $S$  переменных технологического характера, из  $m$  содержащихся в таблице исходных данных:

$$S_e^2 = \frac{1}{N-S-1} \sum_{i=1}^N [y_i - f(\bar{x}_i, \bar{B})]^2. \quad (2)$$

5. Для изучаемого параметра качества, представленного столбцом в таблице исходных данных, определяем дисперсию его рассеивания  $S_y^2$ .

6. На основе полученных данных находим коэффициент детерминации:

$$K_d = 1 - (S_e^2 / S_y^2). \quad (3)$$

7. Вычисления повторяются для всех сочетаний переменных от 1 до  $m$ , при этом каждая комбинация независимых переменных используется для

количественного изучения их влияния поочередно на все параметры качества, представленные в таблице исходных данных.

С помощью приведенного алгоритма решаются задачи определения силы параметров качества и определения сочетаний переменных, комбинация которых в наибольшей степени влияет на характеристики качества отливок.

Решение задач определения причин появления литейных дефектов, разработки и корректировки технических условий на технологический процесс возможно только на основе использования логико-статистических методов обработки данных. Для решения этих задач разработан и реализован на ЭВМ алгоритм № 1, общая схема которого следующая.

1. На основе специально реализованных промышленных экспериментов формируется таблица исходных данных второго рода ТД-2, где в качестве независимых переменных  $x_i$  используются значения технологических переменных при контрольных реализациях технологического процесса, а параметры качества  $y_j$  представлены в логической форме и принимают значение 0 при наличии  $j$ -го дефекта и 1 — при его отсутствии.

2. Для изучения причин появления данного дефекта таблица исходных данных ТД-2 разделяется на две: таблицу ТД-2А, состоящую только из тех строк, для которых значение изучаемого параметра  $y_j=0$ , и таблицу ТД-2Б, состоящую из оставшихся строк таблицы исходных данных, для которых  $y_j=1$ .

3. После выполнения операции логического разделения таблицы исходных данных производится статистическая обработка данных, представленных в таблицах ТД-2А и ТД-2Б. С этой целью в обеих таблицах определяются статистические характеристики переменных  $x_p$ , в том числе их средние значения  $\bar{x}_{ia}$  и  $\bar{x}_{ib}$ , среднеквадратичные отклонения  $S[x_{ia}]$  и  $S[x_{ib}]$  и их доверительные интервалы.

4. Для изучаемой переменной  $x_i$  по данным, представленным в таблицах ТД-2А и ТД-2Б, восстанавливаются функции их распределения, которые обозначим как  $\phi(x_i)$  и  $\psi(x_i)$ . Решение этой задачи является ключевым моментом всей проблемы статистической технологической диагностики. Для восстановления функций распределения разработаны методика и алгоритм на основе парзеновских ядер оценок, идей бутстреп-метода при использовании в качестве базы полной системы функций распределения Джонсона.

5. Полученные функции распределения представляют собой основной инструмент решения задачи. По ним для каждой переменной с использованием квантилей  $x_{0,025}$  и  $x_{0,975}$  определяются верхнее и нижнее допускаемые значения изучаемой переменной. В результате для изучаемой переменной получаем их граничные значения для обеих таблиц:  $x_{iaa}$ ,  $x_{iab}$ ,  $x_{iba}$ ,  $x_{ibb}$ .

6. Полученные данные используются для однозначной математико-логической формулировки условий протекания технологического процесса, при которых получается качественное литье, и описания области, в которой получается литье с дефектами в виде двух логических форм, именуемых в математической логике продукциями:

$$\text{если } [(x_{1an} \leq x_1 \leq x_{1ab}), \text{ и } (x_{2an} \leq x_2 \leq x_{2ab}), \text{ и } \dots \text{ и } (x_{man} \leq x_m \leq x_{mab})], \text{ то } [y_i = 1] \quad (4)$$

$$\text{и если } [(x_1 < x_{1bn}), \text{ или } (x_1 > x_{1bb}), \text{ или } ((x_2 < x_{2bn}), \text{ или } (x_2 > x_{2bb}), \text{ или } \dots \text{ или } (x_m > x_{mbb}))], \text{ то } [y_i = 0]. \quad (5)$$

7. Определение логических форм (4) и (5) производится для всех переменных  $y_j$ .

Полученные результаты статистически обрабатываются в зависимости от массы и сложности отливок, вида применяемого литейного сплава и способа изготовления отливок и могут быть использованы для решения задачи управления качеством литья на стадии их изготовления, а также при проектировании и доводке технологического процесса изготовления отливок.

Описанная методика решения задач технологической диагностики была использована для обработки данных, полученных в результате специально проведенного в промышленных условиях эксперимента. Данные были получены в результате статистического исследования технологического процесса изготовления отливки "звено гусеницы" из стали 110Г13Л в условиях сталелитейного цеха Харьковского тракторного завода. При работе цеха в режиме его нормального функционирования измеряли следующие параметры. На этапе приготовления и разливки металла учитывали количество и качество шихтовых материалов, количество и качество флюсов и раскислителей, фиксировали технологический процесс плавки металла, температуру металла в печи и разливочном ковше, скорость и температуру заливки металла в форму, осуществляли поплавоочный отбор проб на газонасыщенность металла. При изготовлении форм на литейном конвейере проводили процесс маркировки в нижней полуформе каждой полости отливки путем чеканки цифровых индексов в порядке нарастания, отбор проб формовочной смеси из каждой формы перед уплотнением с целью определения ее физико-механических свойств в цеховой экспресс-лаборатории, а также определяли твердость каждой формы и время ее простоя до заливки металлом. Отливки после термической обработки и очистки предъявляли ОТК для разбраковки.

В результате обработки данных получены количественные закономерности формирования параметров качества отливки в зависимости от тех-

нологических факторов. Установлено, что существуют три вида причин, вызывающих брак отливок: значительное случайное отклонение технологического фактора от его номинального значения, неправильно выбранный номинальный уровень независимой переменной и ее допустимые значения диапазона рассеивания и, наконец, неблагоприятное сочетание нескольких факторов, каждый из которых в отдельности находится в допустимых пределах, но сочетание их определенных значений приводит к возникновению брака.

Последний вид причин брака может быть надежно идентифицирован только на основе использования описанного выше алгоритма №1. При этом необходимо реализовать алгоритм на полном переборе комбинаций независимых переменных при изучении каждого параметра качества. В полученной выборке фиксировалось 6 переменных и 10 видов литейных дефектов, полный перебор всех возможных сочетаний независимых переменных составил 62 варианта. Статистическая обработка выполнена на ПЭВМ. Установлены количественные закономерности формирования литейных дефектов. Так, выявлено, что на величину литейного брака по вине литейной формы величина простоев оказывает не меньшее влияние, чем уровень значения физико-механических свойств смеси. Так, коэффициент парной корреляции величины общего брака по вине формы и простоев составляет 0,62, в то время как аналогичные коэффициенты корреляции для физико-механических свойств смеси колеблются в пределах 0,27—0,55. Определены оптимальные пределы изменения независимых переменных, обеспечивающие минимальную вероятность появления литейных дефектов в отливках. Найдены неблагоприятные сочетания независимых переменных и их численных значений, комбинация которых приводит к возникновению основных видов литейных дефектов. Например, сочетание нижнего предела по прочности смеси, верхнего допустимого предела по температуре заливки и значительного простоя приводит к росту брака по вине формы. С точки зрения возникновения газовых раковин особую опасность представляет случай, когда технологические параметры находятся вблизи допустимых границ: газопроницаемость — на нижней, влажность и температура заливки — на верхней. Технологически опасные комбинации переменных и допустимые пределы их изменения определены для всех видов литейных дефектов отливки "звено гусеницы".

На основании полученных результатов проведена корректировка параметров технологического процесса литья, что позволило повысить качество и снизить брак отливок.