

О. И. ШИНСКИЙ, д-р техн. наук, проф., зав. отделом, e-mail: aluprt@ukr.net

И. А. ШАЛЕВСКАЯ, канд. техн. наук, доцент, ст. науч. сотр.,
e-mail: into66@ukr.net

В. О. ШИНСКИЙ, мл. науч. сотр.

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЛИТЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЗАКОНА ПАРЕТО

Применен принцип Парето для оценки эффективности воздействия параметров и литейных объектов при литье по газифицируемым моделям на качество отливок и экологию окружающей среды. Установлена целесообразность и объективность закона Парето для теории и практики литейного производства. Представлена методика графической интерпретации рейтинговой оценки влияния факторов первого, второго и третьего порядка на качество отливок с использованием диаграммы Парето.

Ключевые слова: принцип Парето, литейное производство, значимые факторы, коэффициент влияния, эффективность процесса, уравнения регрессии.

Застосовано принцип Парето для оцінки ефективності впливу параметрів і ливарних об'єктів при литті по моделях, що газифікуються, на якість виливків і екологію навколишнього середовища. Встановлено доцільність і об'єктивність закону Парето для теорії і практики ливарного виробництва. Представлено методику графічної інтерпретації рейтингової оцінки впливу факторів першого, другого і третього порядку на якість виливків з використанням діаграми Парето.

Ключові слова: принцип Парето, ливарне виробництво, вагомі чинники, коефіцієнт впливу, ефективність процесу, рівняння регресії.

The Pareto principle is used to assess the effectiveness of parameters and casting objects during casting in accordance with gasification models for the quality of castings and the ecology of the environment. The expediency and objectivity of the Pareto law was established for the theory and practice of foundry production. The technique of graphical interpretation of the rating of the influence of the factors of the first, second and third order on the quality of castings using the Pareto diagram is presented.

Keywords: Pareto principle, foundry production, significant factors, coefficient of influence, process efficiency, regression equations.

Литейное производство является многофакторным процессом. Так, при реализации полного цикла изготовления отливок из железоуглеродистых сплавов по газифицируемым моделям для контроля технологических параметров, а также экологического состояния литейных объектов, потребуется опросить первичные источники информации 1023–5115 раз в смену или 205–1025 раз в час [1].

В связи с этим становится целесообразным использовать современные компьютерные информационные технологии. Вместе с тем становится возможным уменьшить количество значимых факторов первого, второго, третьего порядка путем дополнительной их оценки с использованием математическо-аналитического метода прогнозирования эффективности событий в виде закона Парето [2].

Этот Закон, или Принцип 80/20, предопределяет, что небольшая доля причин, вкладываемых средств или прилагаемых усилий отвечает за большую долю

результатов, получаемой продукции или заработанного вознаграждения. Например, на получение 80 % результатов, достигаемых в работе, у вас уходит 20 % всего затраченного времени. Выходит, что на практике 4/5 приложенных вами усилий (немалая доля) не имеют к получаемому результату почти никакого отношения. Принцип 80/20 утверждает, что диспропорция является неотъемлемым свойством соотношения между причинами и результатами, вкладываемыми и получаемыми средствами, прилагаемыми усилиями и вознаграждением за них. Выражение «80/20» хорошо описывает данную диспропорцию: 20 % вложенных средств ответственны за 80 отдачи; 80 % следствий вытекают из 20 причин, 20 % усилий дают 80 % результатов.

Закон Парето давно используется в экономических науках, а в последнее время стал использоваться и для оценки влияния множества факторов на качество продукции [3–8].

Установим целесообразность и объективность закона Парето для теории и практики литейного производства.

Для оценки рейтинга эффективности факторов первого, второго и третьего порядка целесообразно воспользоваться методами многофакторного корреляционно-регрессионного анализа, который помогает, во-первых, в изучении целого ряда факторов, влияющих на исследуемый показатель и отборе наиболее значимых; во-вторых, в определении степени влияния каждого фактора на результативный признак путем построения модели – уравнения множественной регрессии, которая позволяет установить, в каком направлении и на какую величину изменится результативный показатель при изменении каждого фактора, входящего в модель; в-третьих, в количественной оценке тесноты связи между результативным признаком и факторными.

Решение такой математической задачи состоит в нахождении аналитического выражения функции

$$\bar{y}_{x_1-x_n} = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (1)$$

которая наилучшим образом отражает связь факторных признаков с результативным.

Выбор формы уравнения множественной регрессии может осуществляться на основе использования пяти типов моделей:

линейная $\bar{y}_{1,2,\dots,n} = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n$; (2)

степенная $y_{1,2-n} = a_0 \cdot x - 1 - a_1 \cdot x_2^{a_2} \cdot \dots \cdot x_n^{a_n}$; (3)

показательная $\bar{y}_{1,2-n} = e^{a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n}$; (4)

параболическая $\bar{y}_{1,2-n} = a_0 + a_1x_1^2 + a_2x_2^2 + \dots + a_nx_n^2$; (5)

гиперболическая $\bar{y}_{1,2-n} = a_0 + \frac{a_1}{x_1} + \frac{a_2}{x_2} + \dots + \frac{a_n}{x_n}$. (6)

Целесообразно останавливаться на линейных моделях. Это объясняется тем, что, во-первых, параметры линейных уравнений легко интерпретируются, сами

модели просты и удобны для анализа, во-вторых, при желании любую функцию путем логарифмирования или замены переменных можно свести к линейной форме.

В уравнении множественной регрессии в линейной форме параметры $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$ – коэффициенты регрессии, показывают степень влияния соответствующих факторов на результативный признак при закреплении остальных факторов на среднем уровне, то есть насколько изменится \bar{y} при увеличении соответствующего фактора на 1 пункт его единицы изменения; параметр a_0 – свободный член, смысла в рейтинговой оценке факторов не имеет.

Для оценки рейтинга влияния факторов предварительно рассчитываются частные коэффициенты корреляции, которые характеризуют степень влияния факторов на результативный признак при условии, что остальные факторы закреплены на постоянном уровне.

В зависимости от количества факторов, влияние которых исключается, частные коэффициенты корреляции могут быть первого порядка (при исключении влияния одного фактора), второго порядка (при исключении влияния двух факторов) и т. д.

Частный коэффициент корреляции первого порядка между y и x_1 при исключении влияния x_2 в двухфакторной модели рассчитывается по формуле:

$$r_{yx_1(x_2)} = \frac{r_{xy_2} \cdot r_{yx_2} \cdot r_{x_1x_2}}{\sqrt{(1 - r_{yx_2}^2) \cdot (1 - r_{x_1x_2}^2)}}, \quad (7)$$

где $r_{yx_1}, r_{yx_2}, r_{x_1x_2}$ – парные коэффициенты корреляции между соответствующими признаками.

Затем определяется совокупный коэффициент множественной корреляции R , который оценивает тесноту связи между результативным признаком и всеми факторами.

Для двухфакторной модели совокупный коэффициент множественной корреляции рассчитывается по формуле:

$$R = \sqrt{\frac{r_{yx_1}^2 + r_{yx_2}^2 - 2r_{yx_1} \cdot r_{yx_2} \cdot r_{x_1x_2}}{1 - r_{x_1x_2}^2}}. \quad (8)$$

Оценку влияния (рейтинга) для применения в законе Парето каждого из частных факторов целесообразно произвести с использованием коэффициента влияния K_B , который определяется из соотношения

$$K_B = \frac{R}{(r_{yx_1}, r_{yx_2}, r_{x_1x_2})}. \quad (9)$$

Далее устанавливается рейтинг K_B в порядке убывания, при этом определяется первых три значения, которые суммарно в большинстве случаев определяют суммарное значение отклика, который равен или превышает 80 % от максимально возможного значения и на основании этих данных производится построение диаграммы Парето.

В целях упрощения выбора математических моделей для рейтинговых оценок влияния и эффективности факторов первого, второго и третьего порядка на отклики, которые описываются созданными уравнениями регрессии (1–10), возможно использовать следующую методику

$$\left\{ \begin{array}{l} a_{0_n} + a_1 Sx_1 + a_2 Sx_2 + \dots + a_n Sx_n = Sy \\ a_0 Sx_1 + a_1 Sx_1^2 + a_2 Sx_1 x_2 + \dots + a_n Sx_1 x_n = Syx_1 \\ a_0 Sx_n + a_1 Sx_1 x_n + a_2 Sx_2 x_2 + \dots + a_n Sx_n^2 = Syx_n \end{array} \right. , \quad (10)$$

где a_0, a_1, a_2, a_n – значения частных коэффициентов; x_1, x_2, x_n – код фактора первого, второго или третьего порядка; Sy, Syx_1, Syx_n – значения откликов при варьировании факторами первого, второго или третьего порядка.

В таком случае оценку влияния (рейтинга) для применения в законе Парето каждого из частных факторов целесообразно произвести с использованием коэффициента влияния K_B , который определяется согласно уравнению

$$K_B = \frac{(A_1)(A_2)\dots(A_n)}{(a_1+a_2+\dots+a_n)}. \quad (11)$$

при условии, что при определении $(A_1), (A_2), (A_n)$ в знаменателе отсутствуют значения с аналогичным индексом, где $(A_1), (A_2), (A_n)$ – максимальные значения каждого частного коэффициента на верхнем уровне интервала варьирования; a_1, a_2, a_n – средние значения частных коэффициентов, определяемых при значениях равных середине интервалов варьирования.

Далее устанавливается рейтинг K_B в порядке убывания, при этом определяется первых три значения, которые суммарно в большинстве случаев определяют суммарное значение отклика, который равен или превышает 80 % от максимально возможного значения, и на основании этих данных производится построение диаграммы Парето.

Графическая интерпретация рейтинговой оценки влияния факторов первого, второго и третьего порядка с использованием диаграммы Парето и представленной методики, в которой используются для определения частного коэффициента K_B уравнения (9, 10), представлена на рисунке.

Анализ графической интерпретации закона Парето при варьировании основными факторами первого порядка позволяют утверждать, что при значениях K_B первых трех факторов, равных 20, 40 и 60 соответственно, позволят достичь вероятности события (качества) в 80 % (см. рис. кривая 2), а последующие факторы позволяют увеличить значение вероятности качества лишь на 10 %.

Одновременно следует отметить, что при возможном увеличении значения одного из основных факторов K_B (2) на 10 % позволят увеличить вероятность события (качества) до 90 % (см. рис. кривая 1), что ранее достигалось при участии в этом событии пяти факторов, но в этом случае при пяти факторах суммарная величина показателя качества возрастает до 95 %.

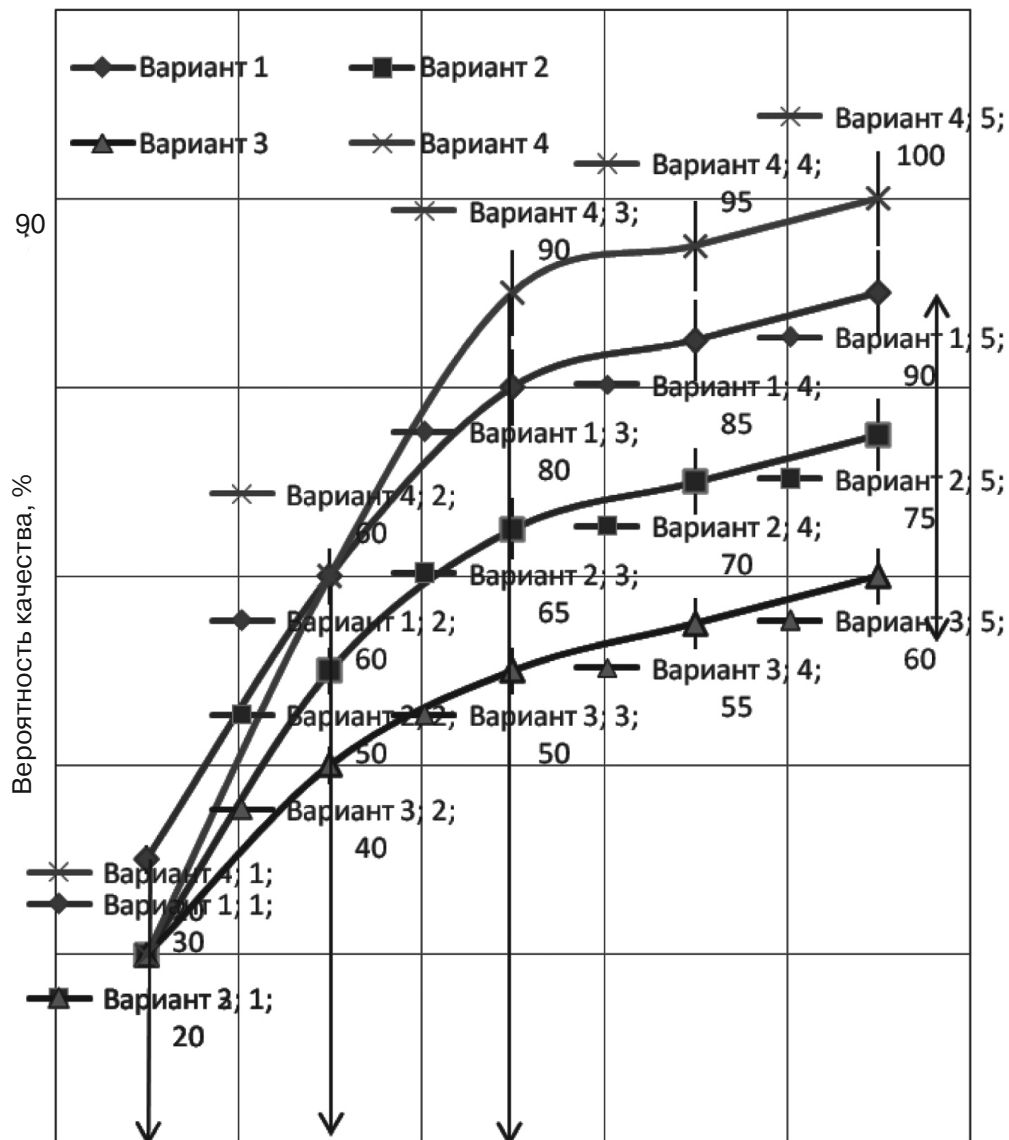
Следует также отметить, что при уменьшении значения одного из основных факторов (2) K_B на 15 % снижает вероятность события (качества) до 70 % (см. рис. кривая 3), а при использовании всех пяти факторов возрастает лишь до заданной эффективности в 80 %, что уже нарушает правило эффективности процесса 80/20.

Анализ влияния факторов на эффективность процесса позволяет также утверждать, что при уменьшении значений двух основных факторов ниже заданного уровня (2, 3) K_B на 10 % снижает вероятность события (качества) до 50 % (см. рис. кривая 3), и даже при использовании всех пяти факторов составляют значения ниже заданной эффективности, то есть до 60 %, а это исключает реализацию такого процесса, как эффективного (рисунок).

Таким образом, адаптация закона Парето для решения эффективных задач в научных и прикладных исследованиях позволяет не только фильтровать излишние

Новые методы и прогрессивные технологии литья

факторы контроля и управления технологическими процессами и литейными объектами, которые участвуют в комплексном цикле изготовления литейной продукции заданного качества, но и дает возможность прогнозировать и корректировать в онлайн параметры процессов, литейных объектов и экологических параметров с



Основные типы эффективных технологических процессов: 1,2,3,4,5 – факторы первого, второго и третьего порядка; оценка эффективности технологических процессов и литейных объектов на качество продукции с использованием закона Парето: вариант 1 – пример достижения максимального качества за счет увеличения эффективности одного из базовых технологических процессов и достижения соотношении 90/20; вариант 2 – типовой пример достижение качества литейной продукции от количества реализуемых технологических процессов соотношении 80/20; вариант 3 – пример снижения качества за счет снижения прогнозируемой эффективности основных технологических процессов (кривые 2, 3) в соотношении 70/20; вариант 4 – пример снижения качества литейной продукции за счет снижения эффективности основных технологических процессов (2) и (3) в соотношении 50/20

целью достижения поставленных задач, обеспечивающих производство литых конструкций высокого качества с минимальными энергетическими и материальными затратами, а также высоким уровнем экологической безопасности.



Список литературы

1. Отчет НИОКР (шифр темы: III-24-12-623-31), Разработка теоретических и технологических основ комплексного контроля, управления физико-химическими и технологическими процессами формообразования с применением дистанционного компьютерного мониторинга характеристик отливок, состояния оборудования и экологической безопасности окружающей среды» (научн. руководитель, д.т.н., проф. О.И. Шинский), ФТИМС НАН Украины, Киев 2016, 664 с.
2. Wikipedia. Режим доступа: <http://www.wikipedia.org.ru>
3. *Льюис К. Д.* Методы прогнозирования экономических показателей / Пер. с англ. – М.: Финансы и статистика, 1986. – 133 с.
4. *Редкозубов С. А.* Статистические методы прогнозирования в АСУ. – М.: Энергоиздат, 1981. – 152 с.
5. *Френкель А. А.* Прогнозирование производительности труда: методы и модели. – М.: Экономика, 1989. – 214 с.
6. *Гладышевский А. И.* Методы и модели отраслевого экономического прогнозирования. – М.: Экономика, 1977. – 143 с.
7. *Кильдишев Г. С., Френкель А. А.* Анализ временных рядов и прогнозирование. – М.: Статистика, 1973. – 103 с.
8. *Каренов Р. С.* Экономическое прогнозирование: Учебник. — Караганда: Изд-во КарГУ, 2003. – 377 с.



References

1. Report (code of the topic: III-24-12-623-31) (2016) «Development of theoretical and technological bases of complex control, management of physico-chemical and technological processes of shaping with the use of remote computer monitoring of characteristics of castings, equipment condition and environmental safety » (Scientific supervisor, Doctor of Technical Sciences, Prof. O. I. Shinskiy), PTIMA NAS of Ukraine, Kiev [in Russian].
2. Wikipedia. Retrieved from: <http://www.wikipedia.org.ru> [in Russian].
3. *Lewis, K.D.* (1986) Methods of forecasting economic indicators / Trans. with English. – Moscow: Finance and Statistics [in Russian].
4. *Redkozubov, S.A.* (1981) Statistical methods of forecasting in the automated control system. Moscow: Energoizdat [in Russian].
5. *Frenkel A.A.* (1989) Forecasting labor productivity: methods and models. Moscow: Economics [in Russian].
6. *Gladyshevsky, A.I.* (1977) Methods and models of industrial economic forecasting. Moscow: Economics [in Russian].
7. *Kildishev, G.S., Frenkel, A.A.* (1973) Time series analysis and forecasting. Moscow: Statistics [in Russian].
8. *Karenov, R.S.* (2003) Economic Forecasting: A Textbook. Karaganda: Izd-vo KSU [in Russian].

Поступила 19.04.2018