САПР

The schema of development and technological process of castings production under supercomputer SKIF, which allows to decrease the periods of gating systems projecting, is offered. The model for appraisal of the variants of the castings production technology, which allows to range the modeled technological processes and to choose the optimal regimes and gating system, is developed.

А. Н. ЧИЧКО, Т. В. МАТЮШИНЕЦ, БНТУ, Л. В. МАРКОВ, ОАО «ММЗ», С. Г. ЛИХОУЗОВ, В. Ф. СОБОЛЕВ, О. И. ЧИЧКО, БНТУ

УДК 669.27:519

МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ДЛЯ САПР ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОТЛИВОК, ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОД СУПЕРКОМПЬЮТЕР СКИФ

Одной из важнейших задач современного литейного производства является разработка алгоритмов САПР, позволяющих разрабатывать с «нуля» и совершенствовать технологию изготовления отливок. Инженеры-литейщики разрабатывают технологию изготовления новой отливки на стадии подготовки и планирования производства в условиях неопределенности физической картины течения расплава в каналах литниковой системы, в значительной степени полагаются на собственный опыт, основанный на спроектированных и опробованных вариантах литниковой системы. Известно, что для одной и той же отливки может быть много различных в пространственном отношении литниковых систем, обеспечивающих получение отливки без дефектов. Выбор методом прототипирования литниковой системы не дает однозначного ответа на вопрос об ее оптимальности с точки зрения качества и энергозатрат. Тем более, что выбор литниковой системы, а значит, и начального приближения по технологии изготовления остается за технологом. Следует отметить, что начальное приближение решения задачи по выбору и оптимизации литниковой системы является наиболее узким местом. Неправильное начальное решение по технологии приводит к невозможности в дальнейшем оптимизации и совершенствования технологии изготовления отливки. Выбор аналога литниковой системы у каждого технолога может быть различным и чем сложнее отливка, тем сложнее принять решение по классификации отливки. Эта проблема становится еще сложнее, когда необходимо выбрать место подвода металла литниковой системы в отливку. Опыт работы многих предприятий показывает, что работающие литниковые системы часто далеки от оптимальных и непрерывно модифицируются путем экспериментирования в работающей технологической цепочке промышлен-

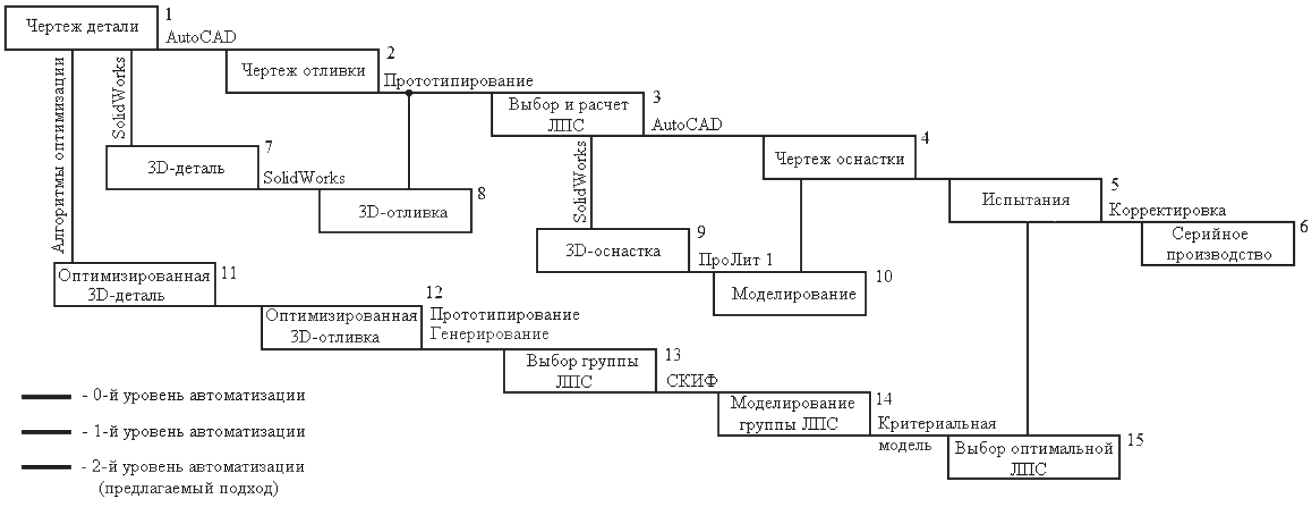

Рис. 1. Укрупненная схема разработки технологии получения отливок в разовых формах

ного предприятия. Таким образом, задача разработки алгоритмических схем для оценки выбора и совершенствования технологического процесса изготовления отливок является важнейшей научно-технической задачей литейного производства.

Цель настоящей работы – сравнительный анализ существующих и разрабатываемой алгоритмических схем автоматизации, которые могут быть использованы в САПР литейного производства для разработки и совершенствования технологического процесса изготовления отливки с целью снижения сроков проектирования технологической оснастки, включающей выбор литниковой системы, режимов заливки металла и повышения качества технологического процесса изготовления отливок.

Введем условно три уровня автоматизации алгоритмических схем, которые могут быть использованы в процессе разработки технологии изготовления отливок (рис. 1). Цепочка 1–2–3–4–5–6 соответствует нулевому уровню автоматизации, цепочка 1–7–8–9–10–4–5–6 – первому уровню автоматизации, цепочка 1–11–12–13–14–15–5–6 – второму уровню автоматизации.

На рис. 2 приведена детализированная схема разработки технологии получения отливок литьем в разовые формы.

Цепочка с нулевым уровнем автоматизации основана в значительной степени на опыте конструктора, методе прототипирования, инженерных методиках расчета и выпуске бумажных чертежей на каждой стадии разработки технологического процесса. Использование современных CAD-, CAE-программных средств позволяет автоматизировать отдельные стадии разработки технологического процесса, что соответствует первому уровню автоматизации. Для развития новых элементов САПР литейного производства предлагается использовать мультипроцессорные технологии, позволяющие за счет быстродействия суперкомпьютера СКИФ рассчитывать большое количество вариантов, среди которых и проводится поиск оптимального решения. Как видно из рис. 2, технолог использует в качестве базисного начального не одно решение «литниковая система – режимы разливки», а группу. Это позволяет исключить большее количество неоптимальных решений среди множества допустимых.

Задача оптимизации технологического процесса изготовления отливки является многоступенчатой, включающей расчеты технологического процесса, моделирование заполнения форм, моделирование кристаллизации металла и промышленные испытания. При этом важнейший этап в предлагаемых алгоритмических схемах (рис. 1, 2) – выбор наилучшего с технологической точки зрения варианта, который проходит промышленную апробацию. Количество итераций процесса разработки технологического процесса во многом зависит от целевой функции, зависящей в общем случае от многих критериальных параметров.

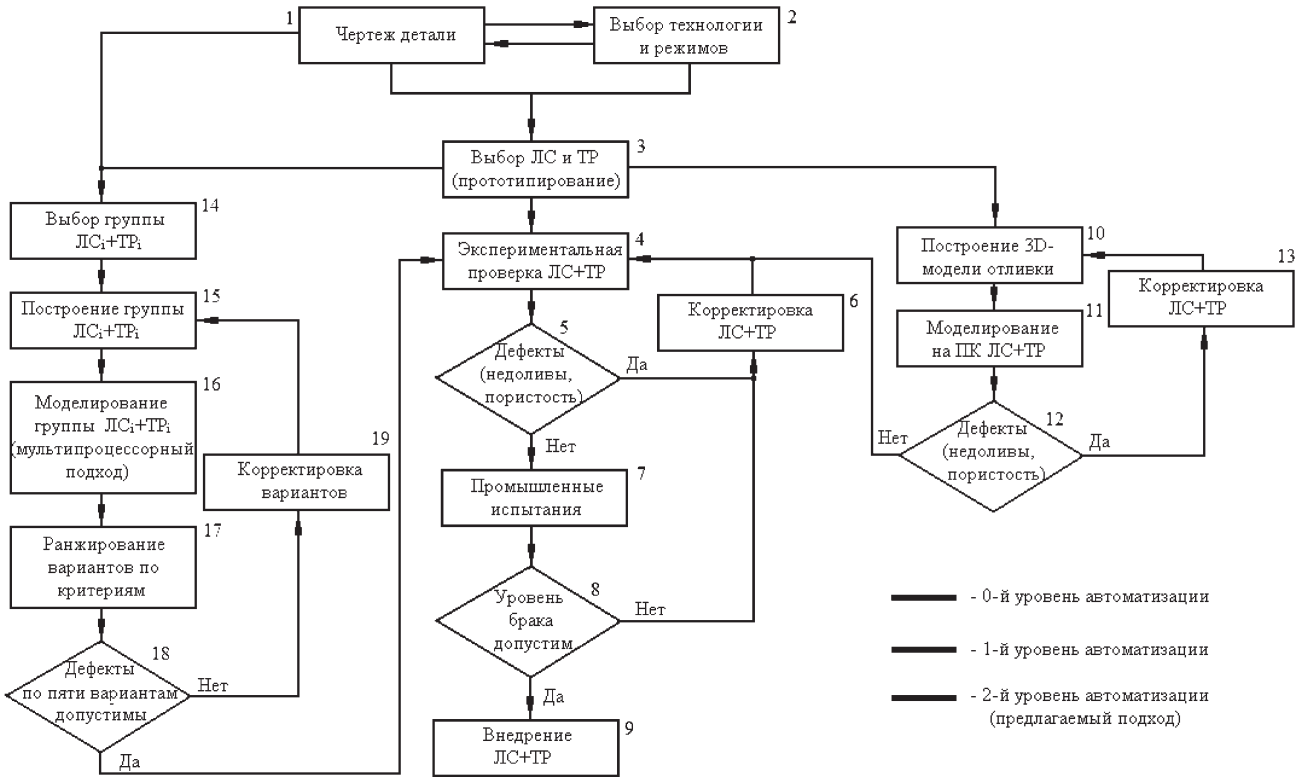

Рис. 2. Сравнение алгоритмов для разработки технологического процесса с различным уровнем автоматизации

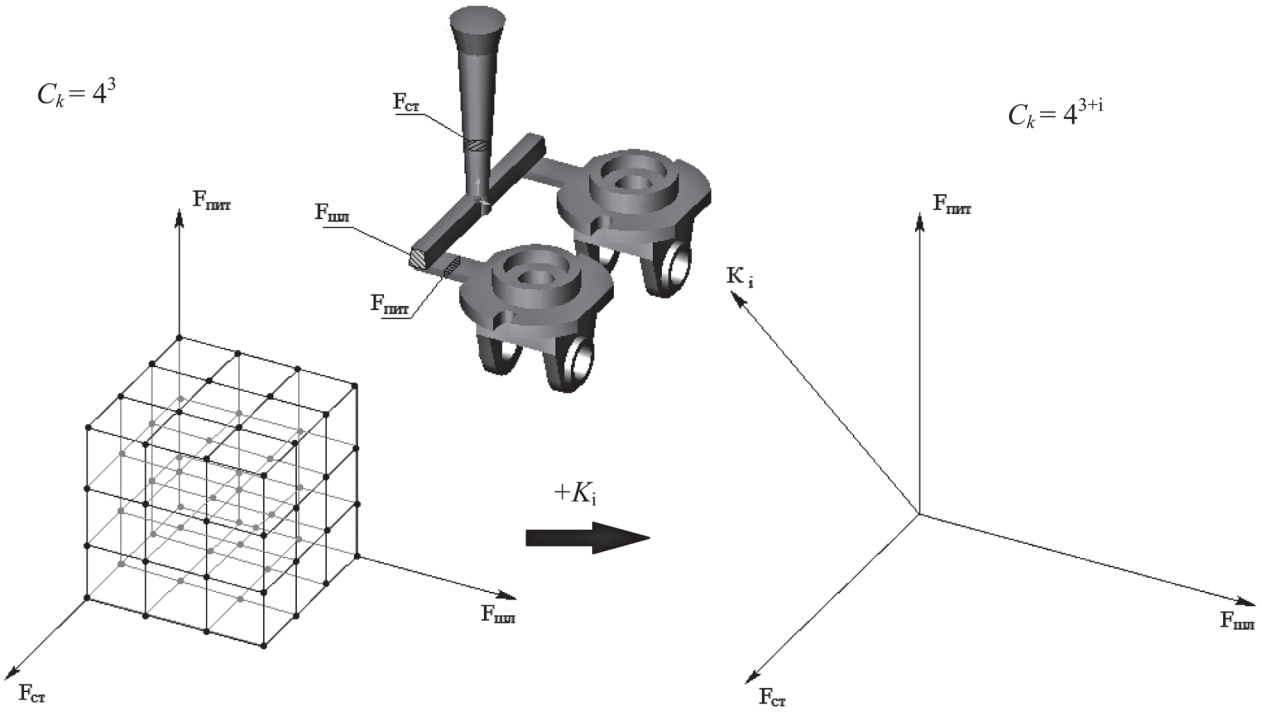

Рис. 3. Схема к задаче выбора литниковой системы

Следует отметить, что задача оптимизации технологического процесса состоит как в нахождении пространственной конфигурации литниковой системы, так и в определении множества технологических параметров литья, обеспечивающих требуемый уровень качества. В общем случае выбор литниковой системы осуществляется на основе огромного числа вариантов, так как пространственные размеры варьируются как по размерам, так и по направлению по отношению к отливке (рис. 3). Если ввести традиционное ограничение для литниковой системы по трем ее размерам «сечение стояка – сечение шлакоуловителя–сечение питателя», то математически задачу можно упростить, сузив область определения пространственных размеров литников. Из рисунка видно, что число рассчитываемых вариантов даже в этом случае большое и при увеличении дополнительных параметров оптимизации может изменяться нелинейно, что требует огромных вычислительных ресурсов.

В общем виде задача оптимизации включает моделирование процесса заполнения отливки, кристаллизацию металла, которые рассчитываются на основе конечно-разностных аппроксимаций уравнений (1)–(3) при ограничениях (4) и выбранном типе литниковой системы.

Предлагается модель, позволяющая соединить численную модель для расчета процесса заполнения и кристаллизации и оптимизационную модель многокритериального типа. Таким образом, модель включает:

уравнение теплопроводности для точек пространственной области $(x, y, z,) \in \Omega_{отл}$:

$$\tilde{n}(T)\rho(T)\frac{dT}{d\tau} = \sum_{i=1}^{3}\frac{d}{dX_i}\left(\lambda_i \frac{dT}{dX_i}\right) + q_v\ ; \qquad (1)$$

систему граничных условий для пространства на границе отливки:

$$\frac{dT}{dX_i} = -\frac{\alpha}{\lambda}(T - T_{ср}),\ i = 1,3\ ; \qquad (2)$$

систему уравнений Навье–Стокса, описывающих процесс движения металла в форме и каналах литниковой системы:

$$\frac{dV_i}{d\tau} + \sum_{j=1}^{3} V_j \frac{dV_i}{dX_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{dp}{dX_i} + \frac{\eta}{\rho}\sum_{j=1}^{3}\frac{d^2V_i}{dX_j^2}, i = 1,3\ ; \qquad (3)$$

систему ограничений по пространственным размерам отливки и множества анализируемых литниковых систем:

$$\begin{cases} F_1^{\min} \le F_1 \le F_1^{\max}, \\ F_2^{\min} \le F_2 \le F_2^{\max}, \\ F_3^{\min} \le F_3 \le F_3^{\max}, \\ \{L_1F_1;\ L_2F_1;\ L_3F_3\} \in \Omega_{\text{îòë}}. \end{cases} \qquad (4)$$

Для оценки варианта технологии предлагаются следующие критерии:

критерий заполняемости формы, который определяется как число сеточных элементов, не заполненных металлом, в процессе моделирования те-

чения металла. Чем больше это число, тем выше вероятность образования дефектов типа недолив:

$$K_1(F_1,F_2,F_3)=\frac{\sum_{i=1}^{ik}\sum_{j=1}^{jk}\sum_{l=1}^{lk}N'_{ijk}(\tau=\tau_k)}{\sum_{i=1}^{ik}\sum_{j=1}^{jk}\sum_{l=1}^{lk}N_{ijk}}\to\min,\ N'_{ijk}\in\Omega_{\text{îòë}};\quad(5)$$

температурный критерий, который является энергетической составляющей технологического варианта. Чем выше температура заливки, тем больше энергии тратится на получение годной отливки:

$$K_2(F_1,F_2,F_3)=\frac{\sum_{i=1}^{ik}\sum_{j=1}^{jk}\sum_{l=1}^{lk}T_{ijk}(\tau=\tau_k)}{\sum_{i=1}^{ik}\sum_{j=1}^{jk}\sum_{l=1}^{lk}N_{ijk}}\to\min;\quad(6)$$

критерий массы литниковой системы. Чем больше коэффициент массы литниковой системы, тем большее количество металла и энергии необходимо для получения годной отливки:

$$K_3(F_1,F_2,F_3)=\sum_{i=1}^{ik}\sum_{j=1}^{jk}\sum_{l=1}^{lk}N''_{ijk}\to\min,\ N''_{ijk}\in\Omega_{\text{ËÑ}};\quad(7)$$

критерий плавности заполнения формы, который определяется как сумма квадратов скоростей каждого сеточного элемента во всем временном промежутке заполнения. Чем больше этот коэффициент, тем больше абсолютная составляющая скоростного поля и выше ее влияние на стенки формы, т. е. при увеличении этого коэффициента повышается вероятность размыва формы:

$$K_4(F_1,F_2,F_3)=\sum_{\tau=1}^{\tau k}\sum_{i=1}^{ik}\sum_{j=1}^{jk}\sum_{l=1}^{lk}V^2_{ijk\tau}\to\min;\quad(8)$$

критерий неравномерности заполнения – величина, равная сумме отклонений ячеечных скоростей от средней скорости в данный момент времени. Чем больше этот коэффициент, тем выше вероятность захвата воздуха и неметаллических частиц в отливку:

$$K_5(F_1,F_2,F_3)=\sum_{\tau=1}^{\tau k}\sum_{i=1}^{ik}\sum_{j=1}^{jk}\sum_{l=1}^{lk}(\overline{V}_\tau-V^2_{ijk\tau})\to\min.\quad(9)$$

Каждый из критериев позволяет ранжировать технологические варианты, однако для выбора наилучшего варианта среди рассчитанных может быть использована целевая функция вида:

$$f=\begin{cases}\sum_{i=1}^{5}\lambda_i K_i,\ \text{åñëè}\ \ K\neq 0,\\ \sum_{i=2}^{5}\lambda_i K_i,\ \text{åñëè}\ \ K=0,\end{cases}\quad(10)$$

где коэффициенты $\lambda_1\ldots\lambda_5$ – весовой вклад каждого из рассчитываемых критериев; τ – время; X_i – декартовы координаты X при $i=1$, Y при $i=2$, Z при $i=3$ соответственно (ось Y направлена вертикально); V_i – проекции скорости жидкости на координатные оси X при $i=1$, Y при $i=2$, Z при $i=3$ соответственно; P – давление жидкости; ρ – плотность жидкости; η – динамическая вязкость жидкости; T – функция температуры в точках отливки (x, y, z, τ) в момент времени τ; $\lambda(T)$ – коэффициент теплопроводности материала при температуре T; $c(T)$ – удельная теплоемкость материала при температуре T; $\rho(T)$ – функция плотности отливки; q_v – функция, учитывающая кристаллизацию металла; $\Omega_{\text{îòë}}$ – пространство, заключенное внутри отливки; $\Omega_{\text{ËÑ}}$ – пространство, заключенное внутри литниковой системы; α_i – коэффициент теплоотдачи между поверхностью отивки и окружающей средой ($i=1$), поверхностью отливки и формой ($i=2$), поверхностью отливки и стержнем ($i=3$); $T_{\text{ср}}$ – температура внешней среды отливки; F_1 – площадь сечения питателя; F_2 – площадь сечения шлакоуловителя; F_3 – площадь сечения стояка; L_1 – длина питателя; L_2 – длина шлакоуловителя; L_3 – длина стояка; $\overline{V}_\tau$ – усредненная скорость для ячеек на момент времени τ; $_{ijk}$ – квадрат скорости для ячейки с координатами $x=i$, $y=j$, $z=k$ на момент времени τ; N''_{ijk} – число ячеек, принадлежащих литниковой системе; T_{ijk} – температура в ячейке с координатами $x=i$, $y=j$, $z=k$ на момент окончания заливки; N'_{ijk} – число ячеек, принадлежащих объему отливки, заполненных металлом на момент окончания заливки; N_{ijk} – общее число ячеек отливки.

Таким образом, разработанная математическая модель отличается от известных целевой функцией и системой ограничений, которые дополняют тепловую трехмерную задачу кристаллизации и движения сплава в форме, что позволяет выбирать наилучшие варианты литниковой системы, обеспечивающие оптимизацию материальных и энергетических ресурсов на производство отливки.

Реализация предложенной математической модели оптимизации технологии изготовления отливки – многокритериальная задача. Анализ работ по многокритериальной оптимизации показывает, что при решении многокритериальных задач важ-

нейшим вопросом является выбор коэффициентов относительной важности компонентов целевой функции [1, 2]. Согласно [3], можно выделить следующие методики для выбора коэффициентов важности: непосредственная численная оценка; оценка в баллах; ранжирование; метод Черчмена–Акофа; метод частот предпочтений; метод Терстоуна; линейная свертка критериев. Рассматриваемые методы подразделяются на две группы: методы, позволяющие рассчитать коэффициент относительной важности критериев по информации, полученной от одного эксперта (непосредственная численная оценка, оценка в баллах, метод Черчмена–Акофа, метод частот предпочтения, линейная «свертка» критериев), и методы, при использовании которых можно получить только обобщенный для всех экспертов ряд коэффициентов (ранжирование и метод Терстоуна). Ниже приведен сравнительный анализ методов численных оценок компонентов целевых функций, которые позволяют определить место развиваемой в работе методологии от известных методов.

Метод численной оценки [1]. Сущность этого метода заключается в вычислении среднего веса каждого из критериев на основе оценок экспертов данной области.

Метод качественной оценки(оценка в баллах) [5]. Метод основан на следующей зависимости для вычисления коэффициентов относительной важности:

$$\lambda_i = \frac{\sum_{j=1}^{m} B_{ij}}{\sum_{j=1}^{m}\sum_{i=1}^{n} B_{ij}}, \qquad (10)$$

где B_{ij} – балл, присвоенный критерию i экспертом j в соответствии со шкалой 0–100 (100 – для наиболее важного критерия).

Метод ранжирования [4, 5]. В качестве коэффициентов относительной важности предлагается использовать относительные частоты преобразованных рангов, определяемых по выражению:

$$\lambda_i = \frac{\sum_{j=1}^{m} R_{ij}}{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} R_{ij}}, \qquad (11)$$

где R_{ij} – преобразованный ранг критерия, который получается приписыванием нуля критерию с максимальным рангом, единицы – следующему за максимальным и т. д.

Метод Черчмена–Акофа [4]. Сущность этого метода заключается в проведении последовательных сравнений между критериями, при котором эксперт приписывает критериям численные значения, лежащие в интервале 0–1. Наиболее важному критерию присваивается значение 1. Составляется ряд сравнительных неравенств между критериями важности (для n критериев n–1 неравенств). Значения, полученные каждым экспертом в ходе решения системы неравенств, нормируются (сумма коэффициентов относительной важности равна единице).

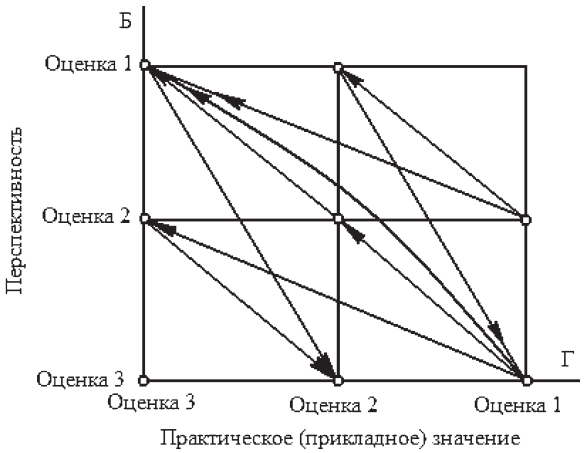

Рис. 4. Пример связей между критериями для метода частот предпочтения

Метод частот предпочтения [3]. Метод частот предпочтений состоит в том, что разрабатывается единая шкала для всех критериев и эксперты сравнивают гипотетические объекты на различных координатных плоскостях по количеству связей от критерия i к критерию j (рис. 4). Количество однонаправленных связей является характеристикой важности критерия i по отношению к критерию j.

Метод Терстоуна [1]. Этот метод основан на законе сравнительных суждений и построении матрицы вероятности $P = \|p_{ij}\|$, элементы которой p_{ij} – вероятность важности критерия i над критерием j:

$$p_{ij} = \int_{-\infty}^{z_{ij}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{z^2}{2}\right\} dz, \qquad (12)$$

где z_{ij} – неизвестная нормирующая переменная.

Далее путем нормирования определяются важности критериев.

Метод линейной свертки критериев [1]. Суть этого метода заключается во введении функции линейной аппроксимации:

$$U(x) = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i u_i(x), \qquad (13)$$

где $U(x)$ – общая полезность; $u(x)$ – полезность i-го свойства; λ_i – коэффициент относительной важности; $\sum_{i=1}^{n} \lambda_i = 1$ – нормирующее условие.

Все критерии численной оценки важности во многом учитывают экспертную оценку, фактически основываются на экспериментальном материале и в этом смысле они равнозначны. Причем эффективность представленных оценок зависит именно от степени достоверности эмпирических данных.

Представленная выше математическая модель для оптимизации технологии изготовления отливки состоит из пяти критериев, которые в применении к задачам разработки технологического процесса могут быть условно разделены на три группы. В первую группу входят критерии, превышение которых выше критического значения не позволяет получать бездефектную отливку, во вторую группу – критерии, позволяющие оценить степень энергосбережения предлагаемой технологии, в третью – критерии, по которым можно оценить вероятность образования устранимых видов дефектов для данной технологии. В этом случае первый критерий является самым важным и только при его выполнении должны «работать» следующие критерии.

Таким образом, в первую группу был отнесен критерий K_1, который характеризует дефект типа недолив, он не может быть исправлен в процессе производства. Отливки с этим дефектом составляют долю возврата в шихтовых материалах плавки. Критерий K_2 характеризует температуру заливки, повышение которой приводит к дополнительным энергетическим затратам на 1 т плавки. Критерий K_3 характеризует массу литниковой системы и его повышение снижает энергосбережение на 1 т плавки. Снижение обоих критериев, с одной стороны, уменьшает энергозатраты процесса, с другой – может приводить к браку литейной продукции. Критерии K_4 и K_5 описывают характер движения металла формы, его турбулентность в различных точках формы. С учетом кристаллизации эти критерии могут оказывать существенное влияние на плотность металла, структуру отливки на макро- и микроуровне.

В общем случае можно записать следующие условия для обеспечения необходимых свойств получаемой отливки:

$$\begin{cases} \hat{E}_1^{\text{êð.min}} < \hat{E}_1 < \hat{E}_1^{\text{êð.max}}, \\ \hat{E}_2^{\text{êð.min}} < \hat{E}_2 < \hat{E}_2^{\text{êð.max}}, \\ \hat{E}_3^{\text{êð.min}} < \hat{E}_3 < \hat{E}_3^{\text{êð.max}}, \\ \hat{E}_4^{\text{êð.min}} < \hat{E}_4 < \hat{E}_4^{\text{êð.max}}, \\ \hat{E}_5^{\text{êð.min}} < \hat{E}_5 < \hat{E}_5^{\text{êð.max}}, \end{cases} \qquad (14)$$

где $\hat{E}_1^{\text{êð.min}}$, $\hat{E}_2^{\text{êð.min}}$, $\hat{E}_3^{\text{êð.min}}$, $\hat{E}_4^{\text{êð.min}}$, $\hat{E}_5^{\text{êð.min}}$ – минимальные значения соответствующих критериев, необходимые для получения годной отливки; $\hat{E}_1^{\text{êð.max}}$, $\hat{E}_2^{\text{êð.max}}$, $\hat{E}_3^{\text{êð.max}}$, $\hat{E}_4^{\text{êð.max}}$, $\hat{E}_5^{\text{êð.max}}$ – максимальные значения соответствующих критериев, необходимые для получения годной отливки.

Алгоритмические схемы для работы технолога по (определению коэффициентов значимости) оптимизации процесса разработки технологии отливки показаны на рис. 5, 6.

В условиях работы конкретного предприятия и для отдельной отливки требования, предъявляемые к качеству получаемой отливки, весьма различаются. Так, для отливок неответственного назначения допускается присутствие некоторого числа устранимого брака, поэтому для этой группы отливок характеристики, описывающие энергосбережение, будут наиболее значимыми. В связи с этим предлагается алгоритмическая схема по определению коэффициентов значимости критерием составляющих линейную сверку, приведенная на рис. 5.

Для ответственных отливок доля допустимого брака должна быть очень мала и поэтому характеристики, определяющие исправимый брак, будут обладать наивысшим приоритетом и коэффициенты значимости предлагается определять по алгоритмической схеме, приведенной на рис. 6.

Предлагаемые алгоритмические схемы позволяют определить порядок значений соот-

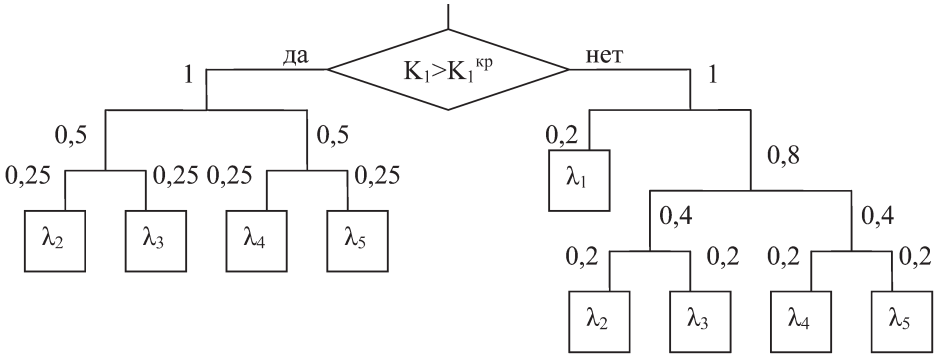

Рис. 5. Алгоритмическая схема по определению коэффициентов значимости целевой функции для технологии, приводящей к допустимому браку отливки

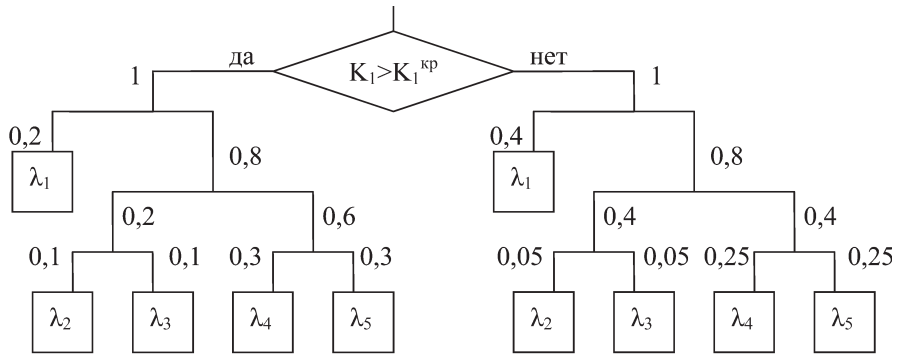

Рис. 6. Алгоритмическая схема определения коэффициентов значимости целевой функции для технологии, приводящей к недопустимому браку отливки

Критериальная оценка

Оптимальная по совокупности критериев отливка

Деталь_32_36_90_032.stt

Выровнять

По заполняемости	По температуре заливки	По массе литниковой системы	По плавности заполнения	По равномерности заполнения
Деталь_48_60_112_032.stt - 0	Деталь_48_60_112_032.stt - 1380	Деталь_32_36_90_032.stt - 29429	Деталь_32_36_134_032.stt - 106,55	Деталь_48_60_134_032.stt - -1,47
Деталь_48_60_90_032.stt - 0	Деталь_48_60_90_032.stt - 1380	Деталь_40_36_90_032.stt - 29469	Деталь_32_48_134_032.stt - 107,19	Деталь_48_60_112_032.stt - -1,38
Деталь_48_48_134_032.stt - 0	Деталь_48_48_134_032.stt - 1380	Деталь_48_36_90_032.stt - 29509	Деталь_32_48_112_032.stt - 107,82	Деталь_48_60_90_032.stt - -0,99
Деталь_48_48_112_032.stt - 0	Деталь_48_48_112_032.stt - 1380	Деталь_32_36_112_032.stt - 29547	Деталь_32_36_112_032.stt - 108,09	Деталь_40_60_134_032.stt - 0,20
Деталь_48_48_90_032.stt - 0	Деталь_48_48_90_032.stt - 1380	Деталь_40_36_112_032.stt - 29587	Деталь_32_48_90_032.stt - 109,21	Деталь_48_48_112_032.stt - 0,28
Деталь_48_36_134_032.stt - 0	Деталь_48_36_134_032.stt - 1380	Деталь_48_36_112_032.stt - 29627	Деталь_32_36_90_032.stt - 109,46	Деталь_48_48_134_032.stt - 0,31
Деталь_48_36_112_032.stt - 0	Деталь_48_36_112_032.stt - 1380	Деталь_32_36_134_032.stt - 29716	Деталь_32_60_134_032.stt - 111,11	Деталь_40_60_112_032.stt - 0,38
Деталь_48_36_90_032.stt - 0	Деталь_48_36_90_032.stt - 1380	Деталь_40_36_134_032.stt - 29756	Деталь_32_60_112_032.stt - 111,13	Деталь_40_60_90_032.stt - 0,50
Деталь_40_60_134_032.stt - 0	Деталь_40_60_134_032.stt - 1380	Деталь_48_36_134_032.stt - 29796	Деталь_40_36_134_032.stt - 111,80	Деталь_48_48_90_032.stt - 0,57
Деталь_40_60_112_032.stt - 0	Деталь_40_60_112_032.stt - 1380	Деталь_32_48_90_032.stt - 29837	Деталь_40_36_90_032.stt - 112,47	Деталь_48_36_134_032.stt - 1,35
Деталь_40_60_90_032.stt - 0	Деталь_40_60_90_032.stt - 1380	Деталь_40_48_90_032.stt - 29877	Деталь_40_48_112_032.stt - 112,76	Деталь_48_36_112_032.stt - 1,53
Деталь_40_48_134_032.stt - 0	Деталь_40_48_134_032.stt - 1380	Деталь_48_48_90_032.stt - 29917	Деталь_40_48_134_032.stt - 112,82	Деталь_40_48_134_032.stt - 2,04
Деталь_40_48_112_032.stt - 0	Деталь_40_48_112_032.stt - 1380	Деталь_32_48_112_032.stt - 29965	Деталь_40_36_112_032.stt - 112,91	Деталь_48_36_90_032.stt - 2,09
Деталь_40_48_90_032.stt - 0	Деталь_40_48_90_032.stt - 1380	Деталь_40_48_112_032.stt - 30005	Деталь_32_60_90_032.stt - 113,00	Деталь_40_48_112_032.stt - 2,19
Деталь_40_36_134_032.stt - 0	Деталь_40_36_134_032.stt - 1380	Деталь_48_48_112_032.stt - 30045	Деталь_48_36_134_032.stt - 114,30	Деталь_32_60_134_032.stt - 2,23
Деталь_40_36_112_032.stt - 0	Деталь_40_36_112_032.stt - 1380	Деталь_32_48_134_032.stt - 30080	Деталь_48_36_112_032.stt - 116,02	Деталь_40_48_90_032.stt - 2,45
Деталь_40_36_90_032.stt - 0	Деталь_40_36_90_032.stt - 1380	Деталь_40_48_134_032.stt - 30120	Деталь_40_48_90_032.stt - 116,12	Деталь_32_60_90_032.stt - 2,47
Деталь_32_60_134_032.stt - 0	Деталь_32_60_134_032.stt - 1380	Деталь_48_48_134_032.stt - 30160	Деталь_48_36_90_032.stt - 116,31	Деталь_32_60_112_032.stt - 2,47
Деталь_32_60_112_032.stt - 0	Деталь_32_60_112_032.stt - 1380	Деталь_32_60_90_032.stt - 30245	Деталь_48_48_134_032.stt - 117,11	Деталь_40_36_134_032.stt - 2,79
Деталь_32_60_90_032.stt - 0	Деталь_32_60_90_032.stt - 1380	Деталь_40_60_90_032.stt - 30285	Деталь_40_60_134_032.stt - 117,30	Деталь_40_36_112_032.stt - 2,90
Деталь_32_48_134_032.stt - 0	Деталь_32_48_134_032.stt - 1380	Деталь_48_60_90_032.stt - 30325	Деталь_48_48_112_032.stt - 117,54	Деталь_40_36_90_032.stt - 3,17
Деталь_32_48_112_032.stt - 0	Деталь_32_48_112_032.stt - 1380	Деталь_32_60_112_032.stt - 30365	Деталь_48_48_90_032.stt - 117,90	Деталь_32_48_112_032.stt - 4,36
Деталь_32_48_90_032.stt - 0	Деталь_32_48_90_032.stt - 1380	Деталь_40_60_112_032.stt - 30405	Деталь_40_60_112_032.stt - 118,08	Деталь_32_48_134_032.stt - 4,41
Деталь_32_36_134_032.stt - 0	Деталь_32_36_134_032.stt - 1380	Деталь_48_60_112_032.stt - 30445	Деталь_40_60_90_032.stt - 118,90	Деталь_32_48_90_032.stt - 4,54
Деталь_32_36_112_032.stt - 0	Деталь_32_36_112_032.stt - 1380	Деталь_32_60_134_032.stt - 30476	Деталь_48_60_134_032.stt - 120,11	Деталь_32_36_134_032.stt - 4,72
Деталь_32_36_90_032.stt - 0	Деталь_32_36_90_032.stt - 1380	Деталь_40_60_134_032.stt - 30516	Деталь_48_60_90_032.stt - 120,22	Деталь_32_36_112_032.stt - 4,88
Деталь_48_60_134_032.stt - 0	Деталь_48_60_134_032.stt - 1380	Деталь_48_60_134_032.stt - 30556	Деталь_48_60_112_032.stt - 120,30	Деталь_32_36_90_032.stt - 5,12

Рис. 7. Критериальные оценки 27 вариантов технологии изготовления отливки «рама», рассчитанные с помощью компьютерной системы «ПроЛит-1с» под суперкомпьютер СКИФ

ветствующих коэффициентов значимости, однако точное значение может корректироваться в ходе накопления данных по значимости видов брака.

На рис. 7 показана 3*d*-модель детали «рама», для которой проведено моделирование на суперкомпьютере СКИФ с помощью программного обеспечения «ПроЛит-1с» (разработка БНТУ). Данная задача включала варьирование параметрами технологии за счет изменения сечений стояка, питателя и шлакоуловителя при неизменном типе литниковой системы.

В таблице приведены данные по расчетным значениям критериев и целевой функции для каждого из 27 вариантов технологического процесса. Из таблицы видно, каким образом проводится процесс выбора характеристик технологии, которые обеспечивают минимизацию критериев качества К1, К2, К3, К4, К5.

Таким образом, предлагаемые критерии 5–9 с учетом функции 10 позволяют по результатам моделирования технологического процесса заполнения формы оценить вариант технологии изготовления отливки.

Расчетные значения критериев и целевой функции для каждого из вариантов

Номер критерия	Файл	К1	К2	К3	К4	К5
1	Деталь_32_36_90_032. stt	0	1380	29429	109,46	5,12
2	Деталь_32_36_112_032. stt	0	1380	29547	108,09	4,88
3	Деталь_32_36_134_032. stt	0	1380	29716	106,55	4,72
4	Деталь_32_48_90_032. stt	0	1380	29837	109,21	4,54
5	Деталь_32_48_112_032. stt	0	1380	29965	107,82	4,41
6	Деталь_32_48_134_032. stt	0	1380	30080	107,19	4,36
7	Деталь_32_60_90_032. stt	0	1380	30245	113,00	3,17
8	Деталь_32_60_112_032. stt	0	1380	30365	111,13	2,90
9	Деталь_32_60_134_032. stt	0	1380	30476	111,11	2,79
10	Деталь_40_36_90_032. stt	0	1380	29469	112,47	2,47
11	Деталь_40_36_112_032. stt	0	1380	29587	112,91	2,47
12	Деталь_40_36_134_032. stt	0	1380	29756	111,80	2,45
13	Деталь_40_48_90_032. stt	0	1380	29877	116,12	2,23
14	Деталь_40_48_112_032. stt	0	1380	30005	112,76	2,19
15	Деталь_40_48_134_032. stt	0	1380	30120	112,82	2,09
16	Деталь_40_60_90_032. stt	0	1380	30285	118,90	2,04
17	Деталь_40_60_112_032. stt	0	1380	30405	118,08	1,53
18	Деталь_40_60_134_032. stt	0	1380	30516	117,30	1,35
19	Деталь_48_36_90_032. stt	0	1380	29509	116,31	0,57
20	Деталь_48_36_112_032. stt	0	1380	29627	116,02	0,50
21	Деталь_48_36_134_032. stt	0	1380	29796	114,30	0,38
22	Деталь_48_48_90_032. stt	0	1380	29917	117,90	0,31
23	Деталь_48_48_112_032. stt	0	1380	30045	117,34	0,28
24	Деталь_48_48_134_032. stt	0	1380	30160	117,11	0,20
25	Деталь_48_60_90_032. stt	0	1380	30325	120,22	–0,99
26	Деталь_48_60_112_032. stt	0	1380	30445	120,30	–1,38
27	Деталь_48_60_134_032. stt	0	1380	30556	120,11	–1,47

Литература

1. Многокритериальные задачи принятия решений / Под ред Д. М. Гвишиани. М.: Машиностроение, 1978.

2. Березовский Б. А. и др. Многокритериальная оптимизация. Математические аспекты. М.: Наука, 1989.

3. Глотов В. А., Гречко В. М., Павельев В. В. Метод определения коэффициентов относительной важности // Приборы и системы управления. 1976. № 8. С. 30–36.

4. Фишберн П. К. Методы оценки аддитивных ценностей // Статистическое измерение качественных характеристик. М.: Статистика, 1972. С. 8–34.

5. Энекроде Р. Т. Взвешенные многомерные критерии // Статистическое измерение качественных характеристик. М.: Статистика, 1972. С. 139–154.