



There are offered the models and algorithms for solution of the technological tasks, connected with optimization of the melts stream processes in gating systems and also for optimization of the process of the industrial details thermal treatment. The algorithms are based on using of design functions of distribution of the object elements on temperatures, speeds, tensile and compressive stresses, received in computer systems "ProLit" and "ProTherm".

О. И. ЧИЧКО, БНТУ

УДК 669.27:519

НОВЫЕ МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ДЛЯ САЕ-СИСТЕМ НЕКОТОРЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Одна из важнейших задач в теории оптимального управления – разработка математических моделей для дискретной оптимизации технологических процессов. В настоящей работе предлагаются два новых метода для оптимизации процессов течения металла в форме и оптимизации процессов охлаждения деталей при термической обработке. Общим в этих, казалось бы, различных физических процессах является то, что математическая форма критериев, используемых при построении моделей, может быть идентична.

Литниковые системы. Компьютерная система «ПроЛит» позволяет моделировать процесс движения расплава в форме, выявляя при этом характер скоростного потока заполнения [1, 2]. Однако разработка литниковой системы может быть более эффективной, если при ее выборе использовать не только визуализацию течения в различных сечениях литниковой системы, а и критерии оценки этого течения. Для разработки и выбора оптимальной литниково-питающей системы необходимы критерии, позволяющие сравнивать между собой процессы течения и заполнения литниковой системы и формы. Предлагается для построения критериев использовать функции, характеризующие распределение рассчитываемых элементов расплава по температуре и скоростям для заданного времени. На рис. 1 представлен общий вид таких функций, полученных на основе обработки ряда литниковых систем и отливок. Как видно из рисунка, для литниковой системы характерно гауссово распределение температур. Часть элементов отливки имеет низкие температуры. Это, скорее всего, контактные элементы системы «металл–форма». Высокие температуры элементов характерны для элементов расплава, находящихся внутри потока. Следует отметить, что вид гауссовой кривой несимметричен, как показали эксперименты по моделированию. Если ввести температуру кристаллизации ($T_{кр}$), то темпера-

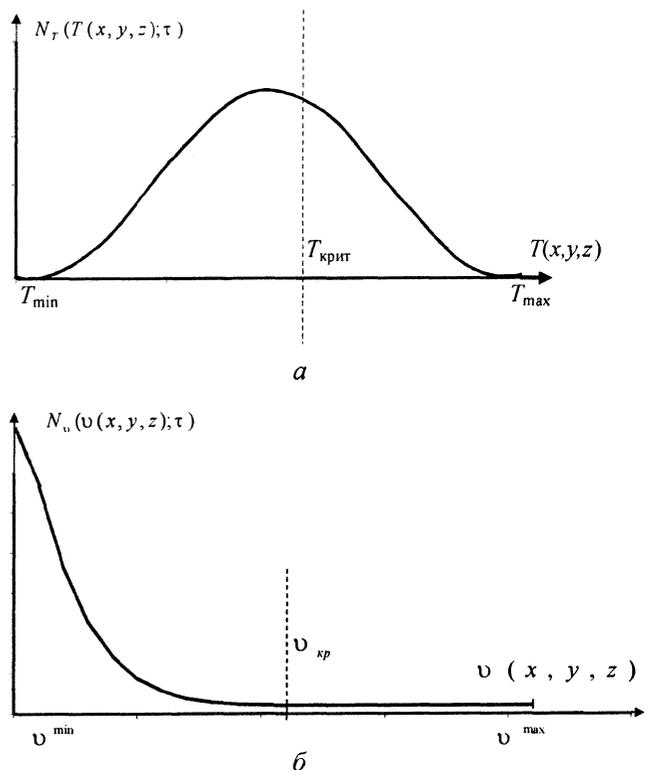


Рис. 1. Схема распределения числа элементов отливки и литниковой системы по температурам (а) и скоростям (б)

тура элементов может находиться в интервале $T_{\min} \leq T_{кр} \leq T_{\max}$ для заданного промежутка времени для случая, когда начинается затвердевание металлов в текущем потоке. Если $T_{кр} > T_{\max}$, то движения металла нет. Если $T_{кр} < T_{\min}$, то это означает, что металл движется и твердая фаза начинает образовываться.

Интегрирование функции $N_T(T(x,y,z);\tau)$ на заданном промежутке по температуре [$T_{кр}$, T_{\max}] позволяет найти долю элементов сплава, превышающих температуру кристаллизации. В то же время интеграл функции $N_T(T(x,y,z);\tau)$ в интервале

$[T_{\min}, T_{\text{кр}}]$ дает возможность определить долю твердой фазы в данный промежуток времени. Для определения характеристик кристаллизации в движущемся расплаве можно предложить следующий критерий:

$$A_1 = \frac{\int_{T_{\min}}^{T_{\text{кр}}} N_T(T(x, y, z); \tau_c) dT}{\int_{T_{\min}}^{T_{\text{max}}} N_T(T(x, y, z); \tau_c) dT}, \quad (1)$$

который характеризует долю образовавшейся твердой фазы (A_1) для данной литниковой системы в заданный момент времени (τ_c).

Для оценки массы литниковой системы введем второе соотношение, характеризующее долю литниковой системы в полном расходе металла на заливку:

$$A_2 = \frac{M_{\text{л}}}{M_{\text{о+л}}}, \quad (2)$$

где $M_{\text{л}}$ — масса литниково-питающей системы; $M_{\text{о+л}}$ — полная масса литниковой системы с отливкой.

Чем меньше величина A_2 , тем меньше расход металла на изготовление отливки. Степень оптимальности литниковой системы зависит от условия $A_2 \rightarrow \min$, которое показывает, насколько выбранная литниковая система, найденная на дискретном множестве, находится близко к оптимальной.

Движение металла в форме характеризуется высокими скоростями движения расплава в форме. При этом может наблюдаться размыв формы, если скорость расплава превышает критическое значение ($v_{\text{кр}}$), характерное для данной формы. Величина $v_{\text{кр}}$ зависит от направления вектора скорости, а также от свойств формовочной смеси. Для фиксированного момента времени и выбранной формы может быть предложен критерий

$$A_3 = \frac{\int_{v_{\text{кр}}}^{v_{\text{max}}} N_v(v(x, y, z); \tau_c) dv}{\int_{v_{\text{min}}}^{v_{\text{max}}} N_v(v(x, y, z); \tau_c) dv}, \quad (3)$$

где $N_v(v(x, y, z); \tau_c)$ — распределение числа элементов по скоростям в расплаве; $v_{\text{min}}, v_{\text{max}}, v_{\text{кр}}$ — соответственно минимальная, максимальная, критическая скорость элементов расплава.

Значение A_3 показывает долю элементов расплава, имеющих высокие скорости и способствующих размыву формы. Если $A_3 \ll 1$, то вероятность размыва формы невелика, т. е. вероятность появления дефекта типа «засор» уменьшается, если

выполняется условие $A_3 \rightarrow \min$. Перечисленные критерии (1)–(3) могут быть вычислены для заданной литниковой системы и отливки на основе данных о температурных и скоростных полях. Критерий A_2 может быть вычислен на основе геометрии литниковой системы и отливки по типу входящих в него элементов.

Таким образом, можно предложить обобщенную математическую модель для оптимизации литниковой системы. Следует отметить, что эта модель не является расчетом литниковой системы, т. е. по ней нельзя определить размеры стояка, питателей, длины литникового хода, но можно оценить лучший вариант литниковой системы среди предлагаемых и виртуально сконструированных. Математическая форма модели имеет вид

$$\left\{ \begin{aligned} & \int_{T_{\min}}^{T_{\text{кр}}} N_T^i(T(x, y, z); \tau_c) dT \\ A_1^i &= \frac{T_{\min}}{T_{\text{max}}} \frac{\int_{T_{\min}}^{T_{\text{кр}}} N_T^i(T(x, y, z); \tau_c) dT}{\int_{T_{\min}}^{T_{\text{max}}} N_T^i(T(x, y, z); \tau_c) dT}, \\ A_2^i &= \frac{M_{\text{л}}^i}{M_{\text{о+л}}^i}, \\ & \int_{v_{\text{кр}}}^{v_{\text{max}}} N_v(v(x, y, z); \tau_c) dv \\ A_3^i &= \frac{v_{\text{кр}}}{v_{\text{max}}} \frac{\int_{v_{\text{кр}}}^{v_{\text{max}}} N_v(v(x, y, z); \tau_c) dv}{\int_{v_{\text{min}}}^{v_{\text{max}}} N_v(v(x, y, z); \tau_c) dv}, \\ y^i &= K_1 A_1^i + K_2 A_2^i + K_3 A_3^i, \\ y^{\text{опт}} &= \min \{y^1, y^2, \dots, y^i\} \end{aligned} \right. \quad (4)$$

где y^i — целевая функция для введенных критериев оценки литниковой системы; K_1, K_2, K_3 — весовые коэффициенты критериев, постоянные для данной формы, начальных и граничных условий расчета. Если $K_j = 0$, то данный критерий не учитывается при выборе литниковой системы; $y^{\text{опт}}$ — оптимальный вариант литниковой системы среди просчитанных; i — число вариантов рассчитываемых литниковых систем.

Модель справедлива для заданного промежуточного времени расчета $\tau < \tau_{\text{зап}}$.

По данной модели может быть предложен алгоритм оптимизации и выбора литниковой системы, состоящий из следующих этапов.

Шаг 0. Построение литниковой системы для заданной отливки.

Шаг 1. Задание начальных и граничных условий для литниковой системы и отливки (температура заливки расплава, температура формы, начальные скорости и давление).

Шаг 2. Моделирование и расчет температурного поля в литниковой системе и отливке $T = f(x, y, z, \tau)$.

Шаг 3. Моделирование и расчет поля скоростей в литниковой системе и отливке $v = f(x, y, z, \tau)$.

Шаг 4. Вычисление характеристик литниковой системы A_1^i, A_2^i, A_3^i .

Шаг 5. Вычисление y^i и накопление данных в массив.

Шаг 6. Если $i < i_{\text{кон}}$, то переход на шаг 0, иначе на шаг 7.

Шаг 7. Нахождение $y^{\text{опт}}$ среди вычисленных y^i на основе решения задачи о минимуме.

Оптимизация термической обработки. При термической обработке в качестве функций, на основании которых предлагается строить критерии, могут быть использованы функция распределения числа элементов детали по температурам ($N_T(T(x, y, z); \tau)$), растягивающим ($N_p(\sigma_p(x, y, z); \tau)$) и сжимающим ($N_{\text{сж}}(\sigma_{\text{сж}}(x, y, z); \tau)$) напряжениям.

Распределение этих функций характеризует в объеме поле температур, поле растягивающих напряжений и поле сжимающих напряжений, что может быть использовано в качестве критериальной оценки режимов термической обработки.

На рис. 2 представлен общий вид перечисленных выше функций распределения, которые получены на основе моделирования процессов охлаждения и нагрева различных деталей [3, 4]. Как видно из рисунка, распределение элементов по температурам, сжимающим и растягивающим напряжениям имеет вид гауссовой кривой. Под действием термической обработки в детали происходят структурные превращения. Например, структура перлита при повышении температуры может переходить в структуру аустенита. При охлаждении возможен обратный переход: аустенит → перлит или аустенит → мартенсит. Следует учесть, что при неоднородном температурном поле разные участки деталей испытывают различные превращения, т. е. в одном элементе детали превращение может только начинаться, в другом оно заканчивается.

Для характеристики структурного превращения можно ввести величину B_1 , физический смысл которой сводится к определению доли объема детали, в которой не прошло превращение, т. е. не образовалась новая структура. Критерий характеризует остаточную структуру детали:

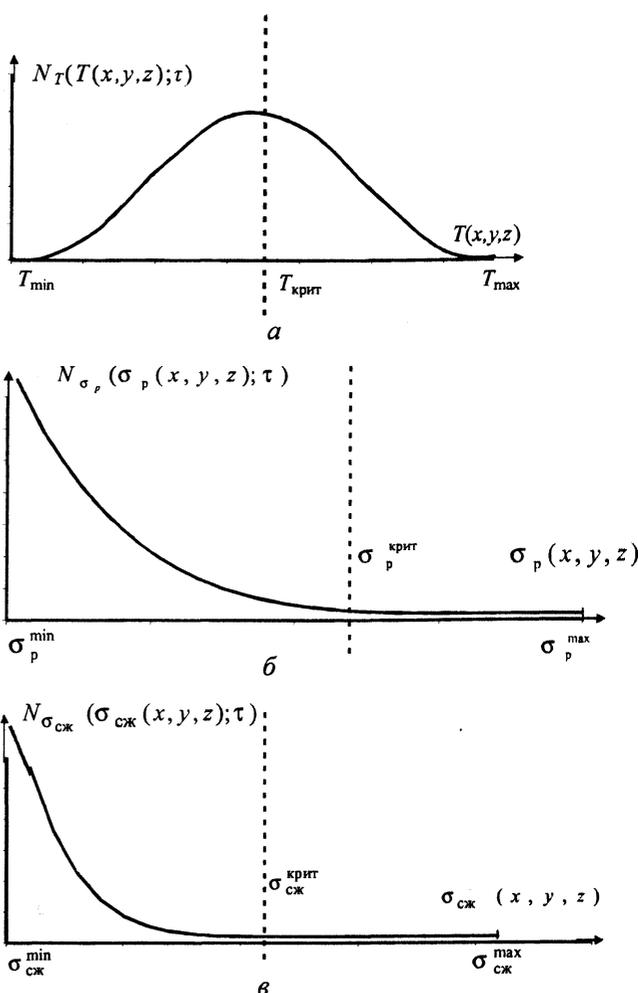


Рис. 2. Схема распределения числа элементов объекта по температурам (а), растягивающим напряжениям (б), сжимающим напряжениям (в)

$$B_1 = \frac{\int_{T_{\text{прев}}}^{T_{\text{max}}} N_T(T(x, y, z); \tau) dT}{\int_{T_{\text{min}}}^{T_{\text{max}}} N_T(T(x, y, z); \tau) dT} < 1, \quad (5)$$

где $T_{\text{прев}}$ — температура структурного превращения; T_{max} — максимальная температура в детали в заданный момент времени τ .

Неравенство (5) является условием протекания структурного превращения на момент времени τ . Аналогичным образом можно ввести критериальные оценки для растягивающих и сжимающих напряжений:

$$B_2 = \frac{\int_{\sigma_p^{\text{кр}}}^{\sigma_p^{\text{max}}} N_p(\sigma_p(x, y, z); \tau) d\sigma}{\int_{\sigma_p^{\text{min}}}^{\sigma_p^{\text{max}}} N_p(\sigma_p(x, y, z); \tau) d\sigma} \leq 1, \quad (6)$$

$$B_3 = \frac{\int_{\sigma_{\text{кр}}^{\text{сж}}}^{\sigma_{\text{max}}^{\text{сж}}} N_{\text{сж}}(\sigma_{\text{сж}}(x, y, z); \tau) d\sigma}{\int_{\sigma_{\text{min}}^{\text{сж}}}^{\sigma_{\text{max}}^{\text{сж}}} N_{\text{сж}}(\sigma_{\text{сж}}(x, y, z); \tau) d\sigma} \leq 1. \quad (7)$$

Следует отметить, что вычисление значений B_1, B_2, B_3 относится к областям, в которых выполняются условия: $T_{\text{min}} < T_{\text{прев}} < T_{\text{max}}, \sigma_{\text{min}}^{\text{сж}} < \sigma_{\text{кр}}^{\text{сж}} < \sigma_{\text{max}}^{\text{сж}},$

$\sigma_{\text{min}}^{\text{р}} < \sigma_{\text{кр}}^{\text{р}} < \sigma_{\text{max}}^{\text{р}}$. Дополняя условия (5)–(7) функцией цели, можно составить обобщенную модель для многокритериальной оптимизации режима термообработки на основе характеристик, получаемых с помощью компьютерных расчетов. Модель выглядит следующим образом:

$$\left\{ \begin{aligned} B_1^i &= \frac{\int_{T_{\text{min}}}^{T_{\text{прев}}} N_{\tau}^i(T(x, y, z); \tau_c) dT}{\int_{T_{\text{min}}}^{T_{\text{max}}} N_{\tau}^i(T(x, y, z); \tau_c) dT}, T_{\text{min}} < T_{\text{прев}} < T_{\text{max}}, \\ B_2^i &= \frac{\int_{\sigma_{\text{кр}}^{\text{р}}}^{\sigma_{\text{max}}^{\text{р}}} N_{\text{р}}^i(\sigma_{\text{р}}(x, y, z); \tau_c) d\sigma}{\int_{\sigma_{\text{min}}^{\text{р}}}^{\sigma_{\text{max}}^{\text{р}}} N_{\text{р}}^i(\sigma_{\text{р}}(x, y, z); \tau_c) d\sigma}, \sigma_{\text{min}}^{\text{р}} < \sigma_{\text{кр}}^{\text{р}} < \sigma_{\text{max}}^{\text{р}}, \\ B_3^i &= \frac{\int_{\sigma_{\text{кр}}^{\text{сж}}}^{\sigma_{\text{max}}^{\text{сж}}} N_{\text{сж}}^i(\sigma_{\text{сж}}(x, y, z); \tau_c) d\sigma}{\int_{\sigma_{\text{min}}^{\text{сж}}}^{\sigma_{\text{max}}^{\text{сж}}} N_{\text{сж}}^i(\sigma_{\text{сж}}(x, y, z); \tau_c) d\sigma}, \sigma_{\text{min}}^{\text{сж}} < \sigma_{\text{кр}}^{\text{сж}} < \sigma_{\text{max}}^{\text{сж}}, \\ y^i &= k_1 B_1^i + k_2 B_2^i + k_3 B_3^i, y^{\text{опт}} = \min\{y^1, y^2, \dots, y^i, \dots, y^n\}, \end{aligned} \right. \quad (8)$$

где i – число вариантов термической обработки; τ_c – заданный промежуток времени; k_i – коэффициент вклада в критериальные свойства (если $k_i = 0$, то свойством можно пренебречь, иначе $k_i = 1$).

По предложенной модели можно сформулировать алгоритм выбора оптимального режима термической обработки.

Алгоритм выбора оптимального режима термической обработки.

Шаг 0. Построение 3d-объекта (деталь). Задание теплофизических характеристик объекта и среды.

Шаг 1. Задание начальных и граничных условий для 3d-объекта (температура детали, температура среды).

Шаг 2. Моделирование и расчет поля температур $T = f_1(x, y, z, \tau)$, растягивающих напряжений $\sigma^{\text{р}} = f_2(x, y, z, \tau)$, сжимающих напряжений $\sigma^{\text{сж}} = f_3(x, y, z, \tau)$.

Шаг 3. Вычисление функций $N_{\tau}^i(T(x, y, z, \tau_c); \tau_c), N_{\text{р}}^i(\sigma_{\text{р}}(x, y, z, \tau_c); \tau_c), N_{\text{сж}}^i(\sigma_{\text{сж}}(x, y, z, \tau_c); \tau_c)$ при заданных τ_c .

Шаг 4. Вычисление B_1^i, B_2^i, B_3^i для i -го объекта детали и заданных режимов термообработки.

Шаг 5. Анализ получаемой структуры B^i при $T \geq T_{\text{кр}}$. Если $T \geq T_{\text{кр}}$, то образуется структура A , иначе структура B .

Шаг 6. Вычисление $y^i = k_1 B_1^i + k_2 B_2^i + k_3 B_3^i$.

Шаг 7. Если $i < i_{\text{конеч}}$, то $(i = i + 1)$ и переход к шагу 0 или шагу 1 в зависимости от задачи, иначе шаг 8.

Шаг 8. Определение $y = \min\{y^1, y^2, \dots, y^i, \dots, y^n\}$.

Предлагаемые модели и алгоритмы могут быть использованы для решения технологических задач, связанных с оптимизацией процессов течения расплавов в литниковых системах, а также для оптимизации процесса термической обработки промышленных деталей. В основе алгоритмов положены расчетные функции распределения элементов объекта по температурам, скоростям, растягивающим и сжимающим напряжениям, получаемым в компьютерных системах «ПроЛит» и «ПроТерм». Для литниковых систем алгоритмы учитывают процесс охлаждения и вероятность образования твердой фазы в движущемся расплаве, а также уровни скоростных потоков. Для термической обработки алгоритмы учитывают структурное превращение в детали, уровень сжимающих и растягивающих напряжений.

Литература

1. Чичко А.Н., Соболев В.Ф., Лихоузов С.Г. Комплекс программных средств «ПроЛит» для моделирования процессов течения и охлаждения расплавов // Программные продукты и системы. 2002. №4. С. 47–48.
2. Чичко О.И., Соболев В.Ф., Махнач В.И., Чичко А.Н. Компьютерное моделирование движения охлаждающегося расплава и системный анализ литниковых систем // Докл. НАН Беларуси. 2002. Т.46. №6. С. 101–106.
3. Чичко А.Н., Яцкевич Ю.В., Соболев В.Ф. Компьютерная система «ПроТерм»: применение для управления процессом термической обработки деталей // ТЭО. 2002. №1. С. 22–23.
4. Чичко А.Н., Яцкевич Ю.В., Соболев В.Ф., Чичко О.И. Компьютерное моделирование в задачах термоупругости сложных пространственных деталей // Изв. вузов. Энергетика. 2003. № 3. С. 68–74.