

методов и средств автоматизированного проектирования. В основе предлагаемой САПР технологического процесса многоиточного резьбощлифования «MONIRESH» – метод проектирования, который базируется на предположении о достижимости равенства оптимальных значений параметров режима резания при обработке заготовки различными инструментами за один проход, т.е. достижимости соотношения:

$$\bar{R}_1^* = \bar{R}_2^* = \dots = \bar{R}_n^* \quad (4)$$

Преобразуем уравнения (3) относительно режимов резания  $\bar{R}_1^*, \bar{R}_2^*, \dots, \bar{R}_n^*$ :

$$\begin{cases} \bar{R}_1^* = f_1^{-1}(\bar{K}_1^*); \\ \bar{R}_2^* = f_2^{-1}(\bar{K}_2^*); \\ \dots \\ \bar{R}_n^* = f_n^{-1}(\bar{K}_n^*). \end{cases} \quad (5)$$

Если условия (4) достигнуты, то можно записать:

$$f_1^{-1}(\bar{K}_1^*) = f_2^{-1}(\bar{K}_2^*) = \dots = f_n^{-1}(\bar{K}_n^*) \quad (6)$$

Поскольку  $\bar{K}_1^*, \bar{K}_2^*, \dots, \bar{K}_n^*$  – суть числа, а вид функций  $f_1^{-1}, f_2^{-1}, \dots, f_n^{-1}$  однозначно определяется системой (3), условия (6) практически недостижимы. Это означает, что без учета дополнительных переменных процесса резания невозможно создать условия, в которых некоторый режим резания  $\bar{R}^*$  будет оптимальным для всех видов обработки, входящих в единый проход. Поэтому введем дополнительную переменную (группу переменных)  $Q$  и используем ее для поиска такого значения  $Q = Q^*$ , при котором выполняются равенства:

$$\begin{cases} \bar{R}_1^* = f_1^{-1}(\bar{K}_1^*, Q^*); \\ \bar{R}_2^* = f_2^{-1}(\bar{K}_2^*, Q^*); \\ \dots \\ \bar{R}_n^* = f_n^{-1}(\bar{K}_n^*, Q^*). \end{cases} \quad (7)$$

а значит, достижимы соотношения:

$$f_1^{-1}(\bar{K}_1^*, Q^*) = f_2^{-1}(\bar{K}_2^*, Q^*) = \dots = f_n^{-1}(\bar{K}_n^*, Q^*). \quad (8)$$

Группа переменных  $Q$  в случае резьбощлифования может быть разбита на три подгруппы: геометрия и материал круга, а также режимы резания.

Далее решается задача оптимизации при ограничениях, вытекающих из технологических и конструктивных характеристик процесса, а также выбранной пользователем целевой функции.

#### Литература

- Федорович В.А. Способы шлифования с комбинированным управлением режимом резанием // Вестник ХГПУ. – 1999. – Вып. 45. – С. 26 – 28.
- Братан С.М. Моделирование взаимодействия режущих элементов с поверхностью заготовки при тонком шлифовании / С.М. Братан, Д.А. Каннов, Ю.К. Новоселов // Современные технологии в машиностроении. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. – С. 23 – 28.
- Русавский Ю.П. Технология производства шариковых передач винт – гайка качения / Ю.П. Русавский, Н.В. Соболева, М.В. Шпапенко. – М.: Машиностроение, 1985. – 128 с.

## К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ МНОГОЦЕЛЕВОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Пертери А.А., Тонконогой В.М., Монова Д.А.

Для многоцелевой оптимизации объединенных технологических процессов (ОТП) механической обработки с помощью комплексного генетического алгоритма (КГА) необходимо, чтобы в процессе одновременно принимала участие группа инструментов, механически связанных между собой, например, общим приводом. Рассмотрим ОТП шлифования несколькими, закрепленными на одном общем валу кругами одновременно и построим математическую модель такого процесса, включающую следующие переменные (табл. 1).

Таблица 1

Параметры процесса шлифования	
Групповые	Индивидуальные
$V_{кр}$ – скорость круга, м/с;	$C$ – стоимость
$V_{дет}$ – скорость детали, м/мин;	$R_{\sigma}$ – шероховатость поверхности детали, мкм
$t$ – глубина резания, мм;	$Z_k$ – зернистость круга, мкм;
$S_{пр}$ – продольная подача, мм/об;	$H$ – твердость круга, Па;
$S_{пов}$ – поперечная подача, мм/мин.	$N$ – твердость круга, Па.

Для различных схем шлифования возможны три основных подхода к многоцелевой оптимизации технологического процесса.

**Подход 1. Последовательная оптимизация.** Схема технологического процесса, подлежащего последовательной оптимизации приведена на рис. 1. Здесь

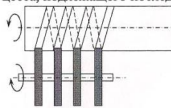


Рис. 1. Схема технологического процесса, подлежащего последовательной или аддитивной оптимизации.

четыре шлифовальных круга последовательно входят в контакт с одной и той же обрабатываемой зоной детали. Поэтому уравнения шероховатости поверхности после каждого прохода

$$R_{\sigma I} = K_1 V_{кр}^{-1,95} V_{дет}^{0,5} t^{0,3} + K_2 (Z_{II}^{1,8} H_I^{-0,85}) + S_{пр}^{0,12} S_{пов}^{0,44}$$

$$R_{\sigma II} = K_1 V_{кр}^{-1,95} V_{дет}^{0,5} t^{0,3} + K_2 (Z_{III}^{1,8} H_{II}^{-0,85}) + S_{пр}^{0,12} S_{пов}^{0,44}$$

$$R_{\sigma III} = K_1 V_{кр}^{-1,95} V_{дет}^{0,5} t^{0,3} + K_2 (Z_{IV}^{1,8} H_{III}^{-0,85}) + S_{пр}^{0,12} S_{пов}^{0,44}$$

$$R_{\sigma IV} = K_1 V_{кр}^{-1,95} V_{дет}^{0,5} t^{0,3} + K_2 (Z_{V}^{1,8} H_{IV}^{-0,85}) + S_{пр}^{0,12} S_{пов}^{0,44}$$

где  $R_{\sigma}$  – шероховатость поверхности детали после обработки, мкм;  $K_1$  – коэффициент, учитывающий характеристики детали;  $K_2$  – коэффициент, учитывающий характеристики круга;  $V_{кр}$  – скорость круга, м/с;  $V_{дет}$  – скорость детали, м/мин;  $t$  – глубина резания, мм;  $Z_k$  – зернистость круга, мкм;  $H$  – твердость круга, Па;  $S_{пр}$  – продольная подача, мм/об;  $S_{пов}$  – поперечная подача, мм/мин, могут быть сведены к одному уравнению вида:

$$R_{\sigma i} = f_i \{ R_{\sigma i}, f_i \{ R_{\sigma i}, f_i \{ R_{\sigma i}, f_i \{ R_{\sigma i} \} \} \} \}$$

В этом случае применение КГА для оптимизации ОТП не имеет математического смысла.

**Подход 2. Аддитивная оптимизация.** Схема технологического процесса, подлежащего аддитивной оптимизации также приведена на рис. 1. Однако в этом случае целевой функцией для каждого шлифовального круга выбрана не-

которая аддитивная характеристика, которая накапливается с каждым проходом, например, стоимость:

$$C = C_1 + C_{II} + C_{III} + C_{IV}.$$

Здесь можно положить целевой функцией суммарную стоимость  $C$  и применить обычные методы оптимизации, а можно использовать КГА для отдельных составляющих аддитивного параметра.

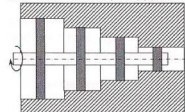


Рис. 2. Схема технологического процесса, подлежащего независимой оптимизации.

**Подход 3. Независимая оптимизация.** Схема технологического процесса, подлежащего независимой оптимизации приведена на рис. 2.

В этом случае приведенные выше уравнения взаимонезависимы по выходам  $R_{1i}, R_{2i}, R_{3i}, R_{4i}$ , и применение КГА становится единственным средством эффективного решения задачи оптимизации с приемлемым качеством и в приемлемые сроки.

### ФАЗОВЫЙ ПОРТРЕТ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «ОТЛИВКА – ЛИТЕЙНАЯ ФОРМА»

Стаиговский А.Л., Желудобовский Д.А., Бибиб Т.В.

Искусство литья, как и любое «служенье муз», не терпит суеты. Даже такие высокоинтенсивные процессы, как теплообмен в динамической системе «отливка – песчаная форма», протекают относительно медленно (знаменитая отливка «Царь-колокол» остывала в земле 2 месяца!). Это позволяет говорить о возможности управления подобными процессами путем внешнего воздействия на систему при ее охлаждении после заливки. К сожалению, многочисленные известные зависимости фазовых переменных системы от времени [1, 2] не позволяют четко сформулировать цель такого управления, за исключением, пожалуй, ускорения процесса, что не всегда приводит к главному результату – качеству отливок.

В последнее время исследователи обратили внимание на важное обстоятельство, позволяющее выдвинуть в качестве цели совпадение (или, наоборот, – несопадение) во времени заранее назначенных событий в литейной форме, к которым относят некоторые поименованные состояния на фазовом портрете объекта управления [3].

Наличие, как минимум, двух синхронизируемых подсистем позволяет рассматривать остывающую в форме отливку с точки зрения теории динамических систем и построить ее фазовый портрет.

Построение начинается с получения теоретических или эмпирических соотношений, связывающих фазовые переменные  $T$  и  $P$  со временем  $\tau$ :

$$T = f_1(\tau); \quad (1)$$

$$P = f_2(\tau); \quad (2)$$

при начальных и граничных условиях:

$$f_1(0) = T_0; \quad f_2(0) = P_0; \quad (3)$$

$$0 \leq \tau \leq \tau_{ep}; \quad T_0 \leq T \leq T_{ep}; \quad P_0 \leq P \leq P_{ep}. \quad (4)$$

Выразим из (2)  $\tau$  через  $P$ :

$$\tau = f_2^{-1}(P) \quad (5)$$

и, подставляя (5) в (1), получим в итоге выражения для фазовых траекторий динамической системы «отливка – песчаная форма» в координатах «температура отливки – давление в форме»:

$$T = f[f_2^{-1}(P)]. \quad (6)$$

Все фазовые траектории, возможные в пределах ограничений, входящих в (4), составляют фазовый портрет системы в указанных координатах (рис. 1).

На рисунке точка  $S$  соответствует синхронизации событий  $T_S$  и  $P_S$  в подсистемах на пути динамической системы от точки  $(T_0; P_0)$  из области начальных условий к естественному аттрактору – точке  $(T_{ep}; P_{ep})$ , соответствующей температуре и давлению окружающей среды.

Как видно из рисунка, траектория 1 фазового портрета системы не проходит через точку  $S$ , а значит, синхронизация событий  $T_S$  и  $P_S$  не произойдет. Если специалистами-литейщиками признано, что такая синхронизация необходима для качества отливок, то целью управления становится изменение траектории 1 на траекторию 2 так, чтобы последняя прошла через точку  $S$ .

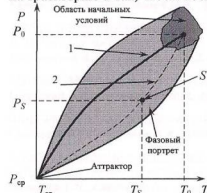


Рис. 1. Фазовый портрет динамической системы «отливка – песчаная форма» в координатах «температура отливки – давление в форме»

В этом случае проблема сводится к возможности математического прогнозирования таких событий с помощью уравнений (1) и (2), что может представлять значительные трудности по разным причинам. Одна из таких причин – так называемые «составные» события, когда имеет место их последовательная цепочка: первое рассчитывается аналитически, чаще всего, по уравнениям тепло- и массопереноса, а последнее происходит из предыдущих, причем эти переходы имеют иную природу и описываются совершенно другими математическими моделями. Примером составного события может служить последовательность: «достижение максимального давления в форме на границе с жидкой отливкой» – «всплытие газового пузыря».

Модель наступления первого элемента последовательности (назовем его предварительным событием) – дифференциальные уравнения выделения и удаления газов из литейной формы, модель второго (основного) события – уравнения гидрогазодинамики гетерогенных сред. В таких условиях синхронизация (десинхронизация) предварительных событий не решает задачу.

На рис. 2 показано, как выполненная десинхронизация предварительных событий не решает общую задачу «развести» основные события во времени,