

УДК 658.512:681.5.01:536.75

Академик П. И. ЯЩЕРИЦЫН, В. И. АВЕРЧЕНКОВ, М. Л. ХЕЙФЕЦ, С. В. КУХТА

### АНАЛИЗ СВОЙСТВ ОТНОШЕНИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ КОМБИНИРОВАННЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

Перспективным направлением в машиностроении является создание новых комбинированных методов обработки, основанных на сочетании в одном процессе различных видов энергии или разных способов воздействия на обрабатываемый материал [1].

В общем виде системная модель технологии [2, 3] представляется сочетанием трех входных потоков: вещества, энергии, информации. Метод обработки целесообразно рассматривать в виде подсистем: материальной и информационной. Первая доставляет и преобразует энергию, необходимую для воздействия на заготовку с целью изменения ее физико-механических свойств, снятия или нанесения материала. Она определяется видом процесса обработки. Вторая управляет потоками энергии и вещества, обеспечивая их доставку в необходимом количестве в заданное место рабочего пространства с целью обеспечения определенной формы, размеров и свойств детали. В результате под методом обработки понимается совокупность энергетических и информационных процессов, направленных на изменение формы, размеров, качества поверхности и физико-механических свойств материала [2, 3].

Для формализации условий целенаправленного создания новых методов обработки каждая совокупность одноименных компонентов описывается как некоторое множество технологических решений (ТР). Такой подход [3, 4] позволяет любой метод обработки представить в виде кортежа, каждый элемент которого является элементом соответствующего множества ТР.

Полагая, что если два любых компонента метода обработки обладают хотя бы одним общим свойством, то между ними существует связь по общности свойств. Это дает возможность организовать выбор ТР по эквивалентности и предпочтению [4].

По эквивалентности выбираются равноименные решения, которые по совокупности своих свойств должны соответствовать друг другу. По предпочтению выбираются решения из числа одноименных, обладающих наилучшими значениями необходимых свойств.

Такой подход позволяет формализовать условия выбора ТР по конкретному значению установленного критерия выбора и дает возможность выбирать решение по нескольким критериям, соответствующим различным свойствам ТР.

Принятие ТР в системах автоматизированного проектирования традиционно основывается на анализе эквивалентности ( $x \equiv y$ ) и предпочтения (нестрогого  $x \leq y$  или строгого  $x < y$ ) решений, заложенных в базу знаний [5]. Это предполагает использование свойств [6]:

- 1) рефлексивности ( $x \equiv x$ ,  $x \leq x$  — истинно;  $x < x$  — ложно);
- 2) симметричности ( $x \equiv y \Rightarrow y \equiv x$  — истинно;  $x \leq y$  и  $y \leq x \Rightarrow x = y$  — антисимметрично;  $x < y$  и  $y < x \Rightarrow$  взаимоисключение — несимметрично);
- 3) транзитивности ( $x \equiv y$  и  $y \equiv z \Rightarrow x \equiv z$ ,  $x \leq y$  и  $y \leq z \Rightarrow x \leq z$ ,  $x < y$  и  $y < z \Rightarrow x < z$  — истинно).

В результате, используя свойство транзитивности, наиболее предпочтительное из предыдущих решений сравнивается с новым предложенным или выбранным из базы знаний по свойствам симметрии параметров качества.

Однако в общем случае разные неэквивалентные ТР наиболее предпочтительны для различных параметров качества из требуемого комплекса свойств. В этом случае необходимо использовать доминирующее ТР ( $x \ll y$ ), характеризующееся свойствами [6]:

- 1) антирефлексивности ( $x \ll x$  — ложно);
- 2) несимметричности ( $x \ll y$  и  $y \ll x \Rightarrow$  взаимоисключение);
- 3) не обладающее свойством транзитивности (из  $x \ll y$  и  $y \ll z$  не следует  $x \ll z$ ).

Поэтому для определения доминирования целесообразно применить синергетическую концепцию, использующую понятие моды непрерывной случайной величины параметра, под которой понимают такое значение параметра, при котором плотность его распределения имеет максимум [7]. Согласно синергетической концепции, устойчивые моды подстраиваются под доминирующие неустойчивые моды и могут быть исключены. Это приводит к резкому сокращению числа контролируемых параметров — степеней свободы. Остающиеся неустойчивые моды могут служить в качестве параметров порядка, определяющих ТР. Получающиеся в результате такого сокращения параметров управления группируются в несколько универсальных классов вида [8]

$$\frac{\partial \vec{U}}{\partial \tau} = \vec{G}(\vec{U}, \nabla \vec{U}) + D \nabla^2 \vec{U} + \vec{F}(\tau),$$

где  $\vec{U}$  — контролируемый параметр;  $\tau$  — текущее время;  $\vec{G}$  — нелинейная функция  $\vec{U}$  и возможно градиента  $\vec{U}$ ;  $D$  — коэффициент, описывающий диффузию, когда его значение действительно, или описывающий распространение волн, при мнимом значении;  $\vec{F}$  — флуктуирующие силы, обусловленные взаимодействием с внешней средой и диссипацией внутри системы.

Уравнения такого вида схожи с описывающими фазовые переходы первого и второго рода, которые в свою очередь определяются критериями переноса [9]. В соответствии с синергетической концепцией фазовые переходы происходят в результате самоорганизации, процесс которой описывается тремя степенями свободы, отвечающими параметру порядка ( $\Pi$ ), сопряженному ( $C$ ) ему полю и управляющему ( $Y$ ) параметру [10].

Использовать единственную степень свободы — параметр порядка, возможно для описания только квазистатического фазового превращения. В системах, значительно удаленных от состояния термодинамического равновесия, каждая из указанных степеней свободы приобретает самостоятельное значение. В них процесс самоорганизации складывается в результате конкуренции положительной обратной связи параметра порядка с управляющим параметром и отрицательной обратной связи с сопряженным полем [7, 8]. Поэтому, кроме процесса релаксации к равновесному состоянию в течение времени  $\tau^p$  при участии двух степеней свободы может реализовываться автоколебательный режим, а при участии трех — возможен переход в хаотическое состояние.

В результате состояние технологической системы характеризуется несколькими режимами [10]:

- 1) релаксационный — реализуется, когда время релаксации параметра порядка намного превосходит времена релаксации остальных степеней свободы ( $\tau_{\Pi}^p \gg \tau_Y^p$  и  $\tau_{\Pi}^p \gg \tau_C^p$ );
- 2) автоколебательный — требует соизмеримости характерных времен изменения параметра порядка и управляющего параметра или сопряженного поля ( $\tau_{\Pi}^p \gtrsim \tau_Y^p$  или  $\tau_{\Pi}^p \gtrsim \tau_C^p$ );
- 3) стохастический — характеризуется странным аттрактором и возможен при соизмеримости времен всех трех степеней свободы ( $\tau_Y^p \gtrsim \tau_{\Pi}^p \gtrsim \tau_C^p$ );
- 4) запоминания — определяется «замороженным» беспорядком при переходе из неупорядоченного состояния и реализуется, когда время релаксации параметра порядка окажется намного меньше остальных времен ( $\tau_{\Pi}^p \ll \tau_Y^p$  и  $\tau_{\Pi}^p \ll \tau_C^p$ ).

Таким образом, доминирование ТР может быть определено критериями процессов переноса энергии и вещества в неравновесных технологических системах. При обосновании выбора ТР и синтезе комбинированных методов необходимо учитывать стабильность формирования параметров качества обработки и рассматривать механизмы управления устойчивостью технологического процесса путем применения обратных связей [11]. Поэтому в качестве целевой функции вместо конкретных значений совокупности критериев выбора предлагается использовать критерии процессов самоорганизации [12], поскольку условия, обеспечивающие самоорганизацию поверхностных явлений и стабилизацию формирования параметров качества обработки являются следствием избыточности рассматриваемой технологической системы по структурному составу [13].

Взаимосвязанные процессы движения и обмена материальными и информационными потоками в технологической системе описываются энтропией [7, 8]

$$\varepsilon = -K \int_0^{\infty} p \ln p dp,$$

где  $K$  — постоянный коэффициент;  $p$  — плотность распределения вероятных состояний системы.

Уравнение баланса локальной плотности энтропии  $\rho\varepsilon$  по времени  $\tau$

$$\partial(\rho\varepsilon)/\partial\tau + \nabla \cdot (\rho\varepsilon \vec{v}) + \nabla \cdot \vec{F}_\varepsilon = \sigma,$$

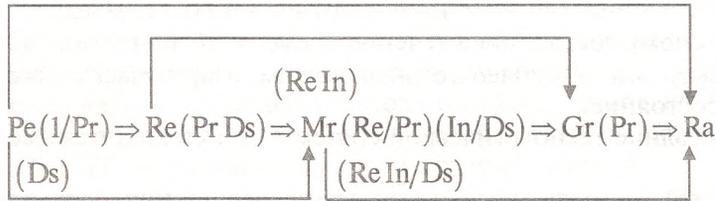
в котором  $\vec{F}_\varepsilon$  — плотность потока энтропии;  $\vec{v}$  — скорость потока;  $\sigma = d\varepsilon/d\tau$  — производство энтропии.

$$\sigma = \vec{F}_q \cdot [\nabla(1/T)] - \sum_{i=1}^k \vec{F}_{di} \cdot [\nabla(W_i/T) - (1/T) \vec{F}_{mi}] - (1/T) \vec{P}_g \cdot \nabla \vec{v} + (1/T) \sum_{i=1}^k W_i \cdot \sum_{r=1}^{R_0} v_{ir} \omega_r,$$

где  $\vec{F}_q$  — плотность теплового потока;  $T$  — абсолютная температура;  $k$  — число компонентов;  $\vec{F}_{di}$  — плотность диффузионного потока  $i$ -го компонента;  $W_i$  — химический потенциал  $i$ -го компонента;  $\vec{F}_{mi}$  — сила масс, действующая на  $i$ -й компонент;  $\vec{P}_g$  — диссипативная часть тензора давления, описывающая вязкие силы;  $R_0$  — число протекающих реакций;  $v_{ir}$  — стехиометрический коэффициент  $i$ -го компонента  $r$ -й реакции;  $\omega_r$  — скорость  $r$ -й реакции.

Производство энтропии в соответствии с фундаментальной теоремой Пригожина-Гленсдорфа, определяющей условия эволюции, стационарности и устойчивости [14] дает возможность рассмотреть критерии, описывающие фазовые переходы различных состояний технологической системы.

Критерии переноса устанавливают последовательность структурообразования в обрабатываемом материале и на формируемой поверхности при увеличении мощности воздействий [9, 12]



в которой  $Pe = vt/\omega$  — критерий Пекле, определяющий отношение количества теплоты, отводимого конвекцией и путем теплопроводности;  $Pr = \nu/\omega$  — критерий Прандтля, характеризующий способность теплоты распространяться в данной среде;  $Re = vt/\nu$  — критерий Рейнольдса, описывающий переход движения обрабатываемого материала из ламинарного в турбулентное;  $In = \beta g \nabla T t^2 / \nu^2$  — отношение подъемной силы плавучести к инерционной силе;  $Ds = \lambda \nabla T t / (\nu \rho \nu)$  — отношение сил капиллярности и вязкости;  $Mr = \lambda \nabla T t^2 / (\rho \omega \nu)$  — критерий Марангони, определяющий возникновение регулярных поверхностных течений вследствие температурной зависимости коэффициента поверхностного натяжения;  $Gr = \beta g \nabla T t^4 / \nu^2$  — критерий Грасгофа, характеризующий естественную конвекцию при свободном движении обрабатываемого материала внутри формируемого слоя;  $Ra = \beta g \nabla T t^4 / (\omega \nu)$  — критерий Рэлея, описывающий образование силой плавучести пространственно-периодических конвекционных вихрей; где  $t$  — характерный размер,  $\omega$  — коэффициент температуропроводности,  $\nu$  — коэффициент кинематической вязкости,  $\beta$  — коэффициент объемного расширения,  $g$  — ускорение свободного падения,  $T$  — абсолютная температура,  $\lambda$  — коэффициент термокапиллярности,  $\rho$  — плотность обрабатываемого материала.

Использование критериев переноса многократно сокращает объем экспериментальных исследований технологических процессов при проектировании комбинированных методов обработки материалов [15].

Таким образом, системный анализ при автоматизированном проектировании методов обработки, помимо эквивалентности и предпочтения, должен базироваться на доминировании свойств отношений технологических решений. Согласно синергетической концепции доминирование контролируемых параметров приводит к ограничению числа состояний технологической системы, которые определяются отношениями времен релаксации параметров системы. Переходы технологической системы из одного состояния в другое описываются критериями переноса, характеризующими определяющие параметры комбинированных методов обработки материалов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований.

### Summary

The dominant characteristics of relations of technological solutions are suggested for using in automated design of the methods materials treatment. Criteria of transfer, which describe the domination of the controled parameters of the oftechological system are considered.

### Литература

1. Ящерицын П. И., Кожуро Л. М., Сенчило И. А., Хейфец М. Л. // Докл. АН Беларуси, 1995, Т. 39, № 1. С. 112—116.
2. Подурев В. Н. Технология физико-химических методов обработки. М., 1985.
3. Рыжов Э. В., Аверченков В. И. Оптимизация технологических процессов механической обработки. Киев, 1989.
4. Голоденко Б. А., Смоленцев В. П. // Вестник машиностроения. 1994. № 4. С. 25—28.
5. Автоматизация проектирования технологических процессов и средств оснащения / Под ред. А. Г. Раковича. Мн., ИТК НАН Беларуси. 1997.
6. Коршунов Ю. М. Математические основы кибернетики. М., 1987.
7. Эбелинг В. Образование структур при необратимых процессах: Введение в теорию диссипативных структур. М., 1979.
8. Хакен Г. Синергетика. М., 1980.
9. Хейфец М. Л., Кожуро Л. М., Мрочек Ж. А. Процессы самоорганизации при формировании поверхностей. Гомель. ИММС НАН Беларуси. 1999.
10. Олемской А. И., Коплык И. В. // Успехи физических наук. 1995, Т. 165, № 10. С. 1105—1144.
11. Ящерицын П. И., Кожуро Л. М., Хейфец М. Л., Чемисов Б. П. // Докл. АН Беларуси. 1997. Т. 41. № 3. С. 121—127.
12. Ящерицын П. И., Шипко А. А., Хейфец М. Л., Попок Н. Н. // Докл. АН Беларуси. 1996. Т. 40, № 1. С. 118—121.
13. Артоболевский И. И., Ильинский Д. Я. Основы синтеза машин автоматического действия. М., 1983.
14. Глендсдорф П., Пригожин И. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуации. М., 1973.
15. Гордиенко А. И., Хейфец М. Л., Чемисова Б. П. и др. Синергетические аспекты физико-химических методов обработки. ФТИ; Полоцк. ПГУ, 2000.