

УДК 621.81.004.67

**СИСТЕМНАЯ МОДЕЛЬ ТЕХНОЛОГИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ,  
УПРОЧНЕНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ДЕТАЛЕЙ АВТОМОБИЛЕЙ**  
**THE SYSTEM MODEL OF TECHNOLOGIES FOR MANUFACTURE,  
SIMPLE AND OPERATION OF PARTS OF AUTOMOBILES**

*Хейфец М.Л.*, доктор технических наук, профессор (НАН Беларуси);  
*Лойко В.А.*, кандидат технических наук;  
*Ивашко В.С.*, доктор технических наук  
(Белорусский национальный технический университет)

*Heifets M.L.*, Doctor of Technical Sciences, Professor (NAS of Belarus);  
*Loyko V.A.*, Candidate of Technical Sciences;  
*Ivashko V.*, Doctor of Technical Science  
(Belorussian National Technical University)

**Аннотация.** *В статье приведены материалы, позволяющие прогнозировать свойства изделий на основе технологических и эксплуатационных исследований с учетом входных потоков данных о веществе, энергии и другой информации.*

**Abstract.** *The article contains materials that allow to predict the properties of products on the basis of technological and operational research, taking into account the input flows of data on matter, energy and other information.*

### **Введение**

Определение и оценка изменений в технологических и эксплуатационных процессах показателей качества деталей машин с учетом их взаимного влияния затруднены многосвязным характером взаимодействий формирующихся свойств изделий.

Для разработки математического аппарата передачи показателей качества изделий при технологическом и эксплуатационном наследовании необходимо корректное понижение размерности задачи описания трансформации свойств [1–4].

Актуально понижение размерности задачи описания трансформации свойств при создании новых интенсивных методов обработки, основанных на сочетании в одном процессе различных видов энергии или разных способов воздействия на обрабатываемый материал [2].

### **Основная часть**

В общем виде системная модель технологии представляется сочетанием трех входных потоков: вещества, энергии, информации.

Поэтому под методом обработки понимается совокупность энергетических и информационных процессов, направленных на изменение формы, размеров, качества поверхности и физико-химических свойств конструкционного материала.

Для формализации условий целенаправленного создания новых методов обработки каждая совокупность одноименных компонентов системы описывается как некоторое множество технологических решений (ТР).

Поэтому возможно 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, между ними существует связь по общности свойств, что дает возможность организовать выбор технологических решений по эквивалентности и предпочтению.

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

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. Это предполагает использование свойств [3, 4]: рефлексивности ( $x \equiv x$ ,  $x \leq x$  – истинно;  $x < x$  – ложно); 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); 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 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: анти рефлексивности ( $x \ll x$  – ложно); несимметричности ( $x \ll y$  и  $y \ll x \Rightarrow$  взаимоисключение); не транзитивности (из  $x \ll y$  и  $y \ll z$  не следует  $x \ll z$ ).

Распределения случайных величин, на фоне которых проявляются моды, описываются законами: равномерным  $f(x) = 1 / (\mu_1 - \mu_0)$ , при  $\mu_0 \leq x \leq \mu_1$ ; экспоненциальным  $f(x) = (1 / \mu) \exp(-x / \mu)$ , при  $\mu > 0$ ,  $x > 0$ ; нормальным  $f(x) = (1 / (\sigma \sqrt{2\pi})) \exp(-(x - \mu)^2 / (2\sigma^2))$ , при  $\sigma > 0$ ,  $-\infty < \mu < \infty$ ,  $-\infty < x < \infty$  где  $\mu$  – математическое ожидание;  $\mu_0$  и  $\mu_1$  – ограничения;  $\sigma^2$  – дисперсия случайных величин  $x$ .

Судить о степени соответствия статистических данных выбранному закону распределения, следовательно о характере проявления моды, позволяет соотношение Романовского:

$$R = (\lambda_p^2 - k) / \sqrt{2k},$$

где  $\lambda_0^2$  – критерий Пирсона;

$k$  – число степеней свободы, т.е. количество групп в изучаемом ряду, рассчитанных ( $\mu$ ,  $\sigma$  и др.) и используемых при вычислении теоретического распределения статистических характеристик.

При выборе количества ограничений для объектов и процессов целесообразно рассмотреть взаимозависимость противоречивых требований по надежности и гибкости производственной системы. В результате соотношение надежности – устойчивости и гибкости – адаптивности может служить критерием, позволяющим принять ТР о рациональной структуре производственной системы.

В самоорганизующихся системах можно управлять гибкостью и надежностью, изменяя число подсистем. Каждая подсистема  $i$  имеет выходы:  $q_1$  – детерминированный строго определенный и  $q_2$  – флуктуирующий с рассеянными характеристиками.

Полный выход подсистемы в первом приближении с учетом аддитивности материальных и информационных потоков:

$$q^{(i)} = q_1^{(i)} + q_2^{(i)}.$$

Считая, что в условиях производства  $q^{(i)}$  – независимая случайная величина, полная величина выхода следующая:

$$Q = \sum_{i=1}^n q^{(i)}.$$

Полный выход, согласно предельной центральной теореме, растет пропорционально числу подсистем  $n$ , в то время как величина рассеяния растет пропорционально квадратному корню  $\sqrt{n}$ . При автоматизированном проектировании принятие ТР по совершенствованию производственных систем целесообразно проводить на основе синергетического анализа технологических и эксплуатационных процессов и объектов [1, 2,].

Согласно синергетической концепции устойчивые моды подстраиваются под доминирующие неустойчивые моды и могут быть исключены. Со-

кращением числа степеней свободы получают уравнения, группирующиеся в несколько универсальных классов, вида:

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

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.

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 [1]. Кроме релаксации к равновесному состоянию в течение времени  $\tau^p$ , при участии двух степеней свободы могут реализовываться как режим запоминания, так и автоколебания, а при участии трех – возможен переход в хаотическое состояние. В результате состояние технологической и эксплуатационной системы характеризуется несколькими режимами [1, 2]: релаксационным – при времени релаксации параметра порядка, намного превосходящим времена релаксации остальных степеней свободы ( $\tau_{\Pi}^p > \tau_Y^p$  и  $\tau_{\Pi}^p \gg \tau_C^p$ ); с запоминанием – при переходе из неупорядоченного состояния в «замороженный» беспорядок, реализуемый в случае, когда время релаксации параметра порядка окажется намного меньше остальных времен ( $\tau_{\Pi}^p \ll \tau_Y^p$  и  $\tau_{\Pi}^p \ll \tau_C^p$ ); автоколебательным – при соизмеримости характерных времен изменения параметра порядка и управляющего параметра или сопряженного поля ( $\tau_{\Pi}^p \gtrsim \tau_Y^p$  или  $\tau_{\Pi}^p \gtrsim \tau_C^p$ ); стохастическим – возможным при соизмеримости характерных времен всех трех степеней свободы ( $\tau_Y^p \gtrsim \tau_{\Pi}^p \gtrsim \tau_C^p$ ).

Моделирование процессов передачи на основе синергетического подхода позволяет учитывать стабильность формирования параметров качества и рассматривать механизмы управления устойчивостью технологического и эксплуатационного процессов через использование обратных связей [1, 2].

Поскольку условия, обеспечивающие самоорганизацию поверхностных явлений и стабилизацию формирования параметров качества интенсивной обработки, являются следствием избыточности рассматриваемой технологической системы по структурному составу [1, 2], целесообразно в качестве целевой функции вместо конкретных значений совокупности критериев выбора использовать критерии самоорганизации процессов [3].

Взаимосвязанные процессы движения и обмена материальными и информационными потоками в технологической системе описываются энтропией [1, 3]:

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

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:

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

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  $i$ -того компонента;

$\vec{F}_{mi}$  – сила масс, действующая на  $i$ -й компонент;

$\omega_r$  – сила масс, действующая на  $r$ -й компонент;

→

$P_g$  – диссипативная часть тензора давления, описывающая вязкие силы;

$R_0$  – число протекающих реакций;

$\nu_{ir}$  – стехиометрический коэффициент  $i$ -го компонента  $r$ -й реакции;

$\omega_r$  – скорость  $r$ -й реакции.

В результате высокоэнергетической обработки в модифицированном переходном поверхностном слое может быть получена достаточно высокая концентрация вводимых атомов [1, 4]. Однако поскольку бомбардирующие ионы претерпевают многочисленные упругие соударения с атомами кристаллической решетки, во внедренном слое образуется большое количество радиационных дефектов, на 2-3 порядка превосходящее число имплантированных атомов. Эти два процесса оказывают существенное влияние на физико-механические и физико-химические свойства поверхности, приводя в некоторых случаях к структурным и фазовым превращениям. Сформированный указанным методом слой композиционного материала обеспечивает эксплуатацию, при которой система трения сама организуется в направлении низкой интенсивности участка нормального износа. Начальные условия формирования и реорганизации модифицированных слоев определяются химическим, фазовым и структурным составом основы, видом и энергией ионов и атомов, участвующих в процессах имплантации и осаждения покрытия, а также энергией взаимодействия поверхностей при трении. Граничные условия зависят от конструкции модифицированных слоев и относительных движений поверхностей в процессе эксплуатации.

### Заключение

Изменение начальных и граничных условий в процессах формирования, модификации и эксплуатации поверхности можно осуществлять потоками энергии различной природы или одним источником с изменяющейся интенсивностью, в том числе используя энергию процессов приработки, износа и разрушения.

Последовательность воздействий при формировании граничных условий и размещении на глубине от поверхности технологических барьеров целесообразно составить в порядке, обратном работе поверхностных слоев: первоначально вносить поток энергии, действующий при эксплуатации, а в последнюю очередь – который имеет минимальные отклонения от начальных условий установившегося режима работы детали.

Рационально формировать наследуемые структуры на операциях обработки и на стадиях эксплуатации. Целесообразно связать эти процессы таким образом, чтобы созданные структуры восстанавливались или перестраивались в зависимости от условий эксплуатации поверхностных слоев детали.

## Литература

1. Хейфец, М.Л. Формирование свойств материалов при послойном синтезе деталей / М.Л. Хейфец. – Новополоцк: ПГУ, 2001. – 156 с.
2. Вакуумно-плазменные технологии в ремонтном производстве / В.А. Лойко [и др.]. – Минск: БГАТУ, 2007. – 190 с.
3. Синергетические аспекты физико-химических методов обработки / А.И. Гордиенко [и др.]. – Минск: ФТИ НАНБ; Новополоцк: ПГУ, 2000. – 172 с.
4. Хакен, Г. Синергетика / Г. Хакен. – М.: Мир, 1980. – 404 с.