

6. Физико-химические методы обработки в производстве авиационных двигателей / Под ред. Б.П. Саушкина. – М.: Дрофа. 2002. – 656 с.

Структурное моделирование и классификация способов электрохимической размерной обработки

Саушкин С.Б., к.т.н. доц. Моргунов Ю.А.
МГТУ «МАМИ»

Аннотация. Проведен анализ моделей, используемых для описания процессов электрохимической размерной обработки. Представлена структурная формула, описывающая множество способов ЭХРО, на базе которой разработана классификация способов и технологий обработки.

Ключевые слова: электрохимическая обработка, технологическая унификация, моделирование технологий.

Моделирование технологических процессов получило значительное развитие и распространение в системах ТПП применительно к технологиям обработки резанием и пластическим деформированием [1–3]. Технологические модели электрохимической обработки недостаточно развиты или носят частный характер [4]. Проведенный ниже анализ позволяет классифицировать имеющиеся частные модели в области электрохимической размерной обработки, как это показано на рисунке 1.

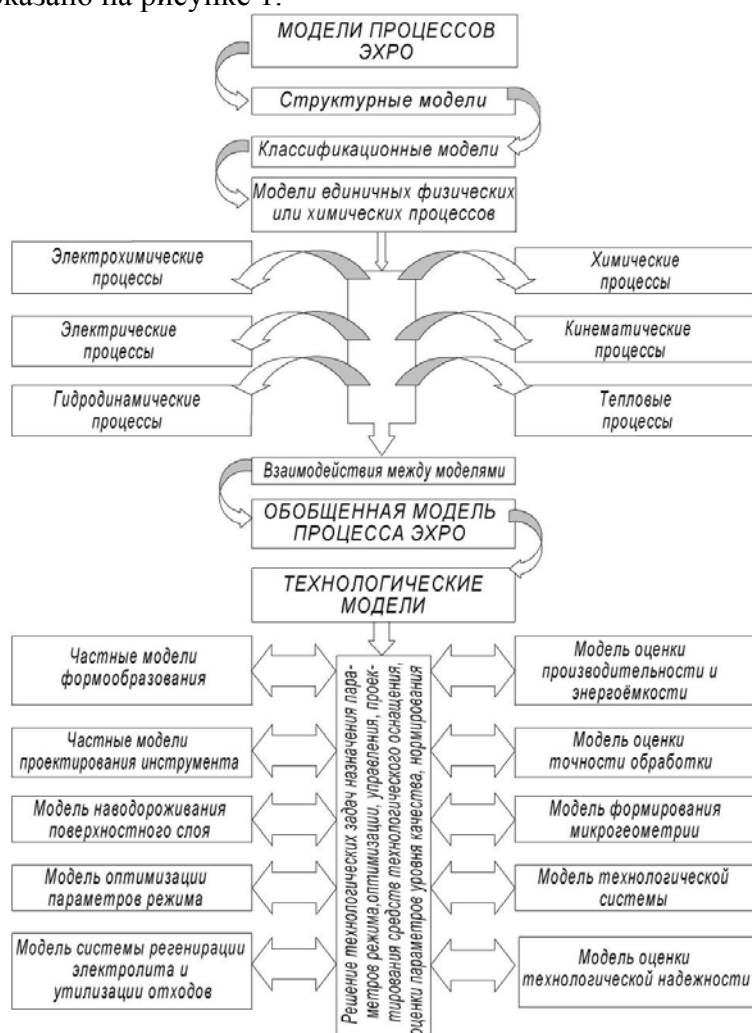


Рисунок 1 – Классификационная модель процессов и технологий ЭХРО

Структурные модели используют для общего или предварительного описания объекта моделирования и позволяют выявить и определить его элементы, их свойства и взаимосвязи между элементами и свойствами элементов. Обычно для построения структурной модели применяют аппарат теории множеств.

Классификационные модели позволяют упорядочить исследуемые объекты, выделить в них общие признаки и ранжировать их по этим признакам.

Познавательные модели используются для количественного описания закономерностей протекания различных процессов или функционирования оборудования. Они устанавливают взаимосвязи, соотношения между величинами, характеризующими процесс или оборудование.

Технологические модели отличаются от познавательных тем, что целью их построения является нахождение количественных взаимосвязей между параметрами режима, условиями функционирования – входами технологической системы и показателями ее технического уровня – выходами системы. Построение технологических моделей всегда связано с оценкой уровня качества и повышением эффективности функционирования технологических систем. Обычно технологические модели строятся на основе математических моделей отдельных процессов или на основе обобщенной модели объекта.

Для разработки унифицированных технологий необходимы модели, описывающие общие свойства технологий и процессов их проектирования, прежде всего, структурные, классификационные и алгоритмические модели.

Математическая модель процесса проектирования технических объектов $S(D)$ согласно современным представлениям [5–6] записывается в виде:

$$S(D) = \{S(A), \rho, S(P), S(T)\}, \quad (1)$$

где: $S(A)$ – модель исходного объекта, ρ – процедурно-алгоритмическая среда, $S(P)$, – модель порождающей среды, $S(T)$ – модель объекта проектирования.

Перечисленные модели представляют в виде типовых математических структур:

$$\begin{aligned} S(A) &= \{A, F^A, R^A\} \\ S(P) &= \{P, F^P, R^P\}, \\ S(T) &= \{T, F^T, R^T\} \end{aligned} \quad (2)$$

где: A, P, T – соответственно множества элементов моделей;

F^A, F^P, F^T – множества свойств этих элементов;

R^A, R^P, R^T – множества отношений между свойствами элементов.

Таким образом, процесс проектирования технических объектов $S(D)$ изображают совместными преобразованиями модели исходного объекта $S(A)$ и модели порождающей среды $S(P)$ с получением модели объекта проектирования $S(T)$, то есть:

$$S(A) \rho S(P) \rightarrow S(T). \quad (3)$$

Так, при проектировании технологического процесса исходным объектом является модель изделия, а модель производственной системы является моделью порождающей среды. Важным этапом проектирования технических объектов является разработка процедурно-алгоритмической среды, определяющей состав (перечень), последовательность и содержание проектных действий.

В работе на основе существующих моделей проектирования технологических процессов и средств технологического оснащения унифицированы и адаптированы основные проектные процедуры с учетом специфики применяемого метода обработки.

Операционная технология основана на одном или нескольких способах обработки [7], поэтому описание (модель) способа обработки характеризует также и соответствующую технологию.

Унифицированная модель способа ЭХРО представляется своей функцией и структурой.

Функция способа размерной обработки представлена в виде:

$$\Gamma_K = \Gamma_0 \Phi_{CO}, \quad (4)$$

где: Γ_K и Γ_0 – конечная и начальная геометрия электрода-заготовки;

Φ_{CO} – оператор преобразования, характеризующий способ обработки.

Анализ показывает, что при разработке конкретных способов и соответствующих технологий ЭХРО конкретизируют следующие условия протекания физико-химических процессов в межэлектродном промежутке:

- *геометрические* (конфигурацию электрода-инструмента – $y_{ЭИ} = f_1(x, t)$, исходной заготовки – $y_3 = f_2(x, t)$, длину гидравлического тракта – L_T , начальный минимальный межэлектродный зазор – a_0);
- *кинематические* (закон перемещения электрода-инструмента $v_K = v_K(t)$);
- *электрические* (напряжение на электродах – U , сила тока – I , средняя плотность тока – $i_{ср}$, электрическое сопротивление межэлектродного промежутка – $R_{ом}$);
- *гидравлические* (давление на входе $p_{вх}$ и выходе $p_{вых}$ из межэлектродного промежутка, направление и среднюю скорость прокачки $v_{эл}$, расход электролита $Q_{эл}$, плотность $\rho_{эл}$ и вязкость $\nu_{эл}$ электролита, гидравлическое сопротивление межэлектродного промежутка – R_T);
- *тепловые* (температуру электролита на входе в зазор $T_{вх}$ и выходе из него $T_{вых}$, теплофизические свойства электролита и материала электродов);
- *электрохимические* (электрохимический эквивалент материала анода – ϵ , состав электролита, его удельную электропроводность $\chi_{эл}$, электродные потенциалы φ_a и φ_k).

Из сказанного следует, что множество способов, формирующих конкретные технологии электрохимической размерной обработки, можно описать общей структурной формулой:

$$S = \{G, K, \mathcal{E}, G_d, T, \mathcal{E}X, C_G, C_K, C_{\mathcal{E}}, C_{G_d}, C_T, C_{\mathcal{E}X}, O\}, \quad (5)$$

где: $G, K, \mathcal{E}, G_d, T, \mathcal{E}X$ – подмножества геометрических, кинематических, электрических, гидравлических, тепловых и электрохимических элементов, характеризующих способ обработки;

$C_G, C_K, C_{\mathcal{E}}, C_{G_d}, C_T, C_{\mathcal{E}X}$ – подмножества свойств этих элементов;

O – множество отношений между свойствами.

Конкретный способ обработки $s_i \subseteq S$ представляется в виде

$$\begin{aligned} s_i = \langle g, k, x, gd, m, xx, C_g, C_k, C_x, C_{gd}, C_m, C_{xx}, o \rangle \\ g \subseteq G; k \subseteq K; x \subseteq \mathcal{E}; gd \subseteq G_d; m \subseteq T; xx \subseteq \mathcal{E}X; \\ C_g \subseteq C_G; C_x \subseteq C_{\mathcal{E}}; C_{gd} \subseteq C_{G_d}; C_m \subseteq C_T; C_{xx} \subseteq C_{\mathcal{E}X}; o \subseteq O. \end{aligned} \quad (6)$$

На основании представленной структуры можно классифицировать способы электрохимической обработки по наиболее значимым признакам:

1. По геометрическим свойствам обрабатываемого объекта разделяют ЭХРО: отверстий – $G1$; наружных поверхностей вращения – $G2$; глухих фасонных полостей – $G3$; пространственно сложных поверхностей – $G4$; плоскостей и уступов – $G5$; пазов – $G6$; поверхностных макро и микрорельефов – $G7$.

2. По кинематике относительного перемещения электродов:

- обработка с неподвижными электродами, $K1$;
- обработка с поступательным перемещением катода-инструмента, $K2$;
- обработка с наложением вибраций на поступательное перемещение катода-инструмента, $K3$;
- обработка с циклическим перемещением инструмента по заданной программе, $K4$;
- обработка с вращением осесимметричного электрода и поступательным перемещением его оси относительно противозэлектрода, $K5$;
- обработка с пространственносложным относительным перемещением электродов, $K6$.

Способы *K1 - K4* обеспечивают формирование профиля заготовки путем прямого копирования формы рабочей поверхности электрода-инструмента, способ *K5* – путем копирования траектории перемещения инструмента простой геометрической формы (метод следов), способ *K6* реализуется, например, при взаимном обкатывании производящей и формируемой поверхностей.

3. По виду используемого технологического тока:

- обработка постоянным током, Э1;
- обработка импульсным током, Э2;
- обработка биполярным током, Э3.

Обычно источник питания формирует и поддерживает заданные параметры напряжения или тока. Поэтому подмножество электрических элементов в структуру способа обработки можно удвоить, указывая режим работы источника питания (ЭН, ЭТ).

4. По гидродинамическим показателям:

- обработка с постоянным давлением на входе в межэлектродный промежуток (МЭП), ГД1;
- обработка с пульсирующим давлением, ГД2;
- обработка с периодическим изменением направления прокачки, ГД3;
- обработка с регулируемым изменением перепада давления на МЭП (подпор электролита, ГД4; введение газа в электролит, ГД5; отсос газожидкостной смеси с помощью щелевых и сотовых электродов-инструментов, ГД6);
- обработка с перемещением электролита полем центробежных сил при вращении инструмента или заготовки, ГД7;
- обработка с подачей электролита напорной струей, ГД8.

5. По характеру формирования температурного поля в зоне обработки:

- поле формируется естественным путем (самопроизвольно), Т1;
- используется внешний источник нагрева, Т2;
- используется внешний источник охлаждения, Т3.

6. По особенностям протекания электродных процессов и процессов переноса в МЭП.

В данном случае в качестве структурного элемента, характеризующего способ обработки, рекомендуется указывать состав электролита. Действительно, основные электрохимические свойства таких процессов определяются природой пары «материал электрода – электролит». Применительно к анодным процессам состав электролита определяет потенциал активации, выход по току, степень окисления ионов металла, переходящих в раствор, характер растворения (активированное, пассивное, транспассивное), потенциал растворения при заданной плотности тока, состав продуктов электролиза.

Имеющийся опыт позволяет предложить следующую классификацию по указанному признаку:

- водные растворы кислот, ЭХ1;
- водные растворы щелочей, ЭХ2;
- водные растворы минеральных солей: галоидных – ЭХ3, кислородсодержащих – ЭХ4, бисолевых – ЭХ5;
- многокомпонентные электролиты со специальными добавками, ЭХ6;
- неводные электролиты, ЭХ7;
- водно-органические электролиты, ЭХ8.

7. По характеру синхронизации свойств отдельных элементов во времени (отношения между свойствами):

- способы с поддержанием постоянных условий электролиза, О1;
- способы с функциональным изменением отдельных элементов структуры во времени, О2;
- способы с синхронным периодическим изменением свойств отдельных элементов структуры во времени (циклическая обработка), О3.

Системное представление множества способов обработки показано в таблице 1. На основе представленной классификации средствами комбинаторики можно построить множество принципиально возможных способов электрохимической обработки с различными структурами. Так, для обработки лопаток методом прямого копирования существует 1620 комбинаций с различной структурой.

Таблица 1

Системное представление множества способов обработки

Классификационный признак	Буквенно-цифровое обозначение классификационных элементов							
1. По геометрическим свойствам обрабатываемого объекта	Г1	Г2	Г3	Г4	Г5	Г6	Г7	-
2. По кинематике относительного перемещения электродов	К1	К2	К3	К4	К5	К6	-	-
3. По виду используемого технологического тока	Э1	Э2	Э3	-	-	-	-	-
4. По гидродинамическим показателям	ГД1	ГД2	ГД3	ГД4	ГД5	ГД6	ГД7	ГД8
5. По характеру формирования температурного поля в зоне обработки	Т1	Т2	Т3	-	-	-	-	-
6. По особенностям протекания электродных процессов и процессов переноса в МЭП	ЭХ1	ЭХ2	ЭХ3	ЭХ4	ЭХ5	ЭХ6	ЭХ7	ЭХ8
7. По характеру синхронизации свойств отдельных элементов во времени		О2	О3	-	-	-	-	-

Очевидно, не все из них окажутся приемлемыми для достижения требуемого конечного результата. Действительно, по аналогии с выражением (1) функцию i -го способа формообразования можно представить в виде:

$$G_{ki} = G_{oi} \Phi_{СП,i},$$

где $\Phi_{СП,i}$ – оператор формообразования, характеризующий данный способ.

Для сравнения способов между собой недостаточно констатировать сам факт заданного преобразования геометрии изделия. Необходимо оценить показатели, характеризующие конечный результат технологического движения, такие как показатель быстродействия (время преобразования геометрии объекта), ресурсозатраты, показатели соответствия конечной конфигурации объекта некоторому эталону (погрешности макро- и микрогеометрии) и др.

Можно заключить, что возможность заданного преобразования геометрии обрабатываемого объекта является необходимым условием существования данного способа обработки. Достаточным условием следует считать приемлемый в некотором смысле уровень показателей эффективности технологии, основанной на этом способе.

Выводы

Сформирована унифицированная модель способа электрохимической размерной обработки и представлены ее функция и структура. Эта модель используется при разработке структуры унифицированной операции ЭХРО и структуры перспективного электрохимического станка.

Литература

1. Расторгуев Г.А., Рогов В.А. Перспективы развития технологических процессов в машиностроении/ Технология машиностроения. 2009, №2. – С. 68–71.
2. Белянин П.Н. О научных основах машиностроительных технологий.– М.: НИАТ. 1988. – 152 с.
3. Кузьмин В.В., Схиртладзе А.Г., Усов С.В. Математическое моделирование технологиче-

- ских процессов в машиностроении. – М.: Славянская школа. 2002. – 234 с.
4. Технология электрохимической обработки деталей в авиадвигателестроении / В.А. Шманев, В.Г. Филимошин, А.Х. Каримов и др. – М.: Машиностроение. 1986. – 168 с.
 5. Цырков А.В., Марьин Б.Н., Русин М.Ю. Системы автоматизированного проектирования в авиа- и ракетостроении. В кн.: Теоретические основы авиа- и ракетостроения / А.С. Чумадин, В.И. Ершов, В.А. Барвинок и др. – М.: Дрофа. 2005. – С. 716–784 с.
 6. Соколов В.П., Цырков А.В. Математическое, методическое и организационное обеспечение технологической подготовки производства / Информационные технологии в наукоемком машиностроении / Под ред. А.Г. Братухина. – К.: Техника. 2001. – С. 475–500.
 7. Физико-химические методы обработки в производстве газотурбинных двигателей: Учебное пособие / Под ред. Б.П. Саушкина. – М.: Дрофа, 2002. – 656 с.

Комплексный геометрический контроль колец шариковых подшипников на координатно-измерительной машине

к.т.н. проф. Суслин В.П., к.т.н. доц. Джунковский А.В., Холодов Д.А.

МГТУ «МАМИ»

8-945-223-05-23 доб. 14-92

Аннотация. В статье описан метод комплексного контроля геометрических параметров колец шариковых подшипников с помощью координатно-измерительной машины (КИМ) вместо ряда специализированных приборов, используемых на предприятиях подшипниковой промышленности. Результаты проведенных экспериментов позволяют сделать вывод о возможности подобного контроля с помощью КИМ.

Ключевые слова: координатно-измерительная машина, торовые поверхности, беговые дорожки, шариковые подшипники, кольца шариковых подшипников.

Качество работы собранных подшипников во многом определяется параметрами внутреннего и наружного кольца подшипников. Досборочный контроль геометрических параметров колец в большинстве случаев производится с использованием ряда специализированных приборов, таких как Talylond, Form Talysurf, Talysenta и др. [5, 6]. Точность вращения характеризуется при этом следующими параметрами: радиальными биениями внутреннего и наружного колец; боковыми биениями торца внутреннего кольца; боковым биением по дорожкам качения внутреннего и наружного колец [7].

В лаборатории САПР МГТУ «МАМИ» разработан метод комплексного геометрического контроля колец подшипников с использованием координатно-измерительных машин (рисунк 1).

Отклонения по биениям подшипника обусловлены главным образом погрешностями формы и расположением поверхностей колец. Так, радиальное биение может быть вызвано радиальным биением колец (разностенностью). Осевое биение обусловлено осевым биением колец, т. е. непараллельностью плоскости центров кривизны беговой дорожки торцу кольца, или нарушением профиля беговой дорожки [4].

Использование КИМ позволяет измерять геометрические параметры и биение колец подшипника, независимо от его базирования и точности попадания в экстремальные точки беговой дорожки кольца подшипника. Экспериментальные исследования на КИМ проводились с использованием измерительной программы ГеоАРМ, разрабатываемой в лаборатории САПР, дополненной модулями измерения тора.

Геометрическими параметрами для контроля являются:

- диаметр цилиндрического отверстия внутреннего кольца и диаметр цилиндра внешнего кольца;