

Сариллов М. Ю.
M.Yu. Sarilov

**ПРИМЕНЕНИЕ СИНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОДХОДА К ИССЛЕДОВАНИЮ
ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОГО ПРОЦЕССА**

A SYNERGY APPROACH TO THE STUDY OF ELECTROEROSION PROCESSES



Сариллов Михаил Юрьевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: sarilov@knastu.ru.

Mr. Mikhail Yu. Sarilov – Doctor of Engineering, Professor at the Department of Mechanical Engineering Technology of the Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur), e-mail: sarilov@knastu.ru

Аннотация. В данной статье дано краткое понятие синергетики и синергетического подхода к электроэрозионной обработке (ЭЭО). Даны представления об изменении энтропии в процессе ЭЭО в виде соответствующих формул, позволяющих моделировать эти изменения.

Summary. This paper deals with the synergetic approach to electrical discharge machining. It presents the idea of how entropy changes during the process of EDM, with formulas to model such changes.

Ключевые слова: синергетика, энтропия, неравновесный процесс, ЭЭО, колебания, устойчивость, диссипативная структура, энергия, эффективность, критерий.

Keywords: synergetics, entropy, non-equilibrium processes, EDM, vibrations, stability, dissipative structure, energy, efficiency, criterion.

УДК 621.9.048.4: 681.324

Синергетика показывает, как законы природы приводят к появлению определенного порядка в неупорядоченных системах и затем к усложнению и развитию образовавшихся упорядоченных структур. М. Эйгеном было показано, что в сложных сильно неравновесных системах возможно возникновение записи информации в виде некоторого кода, с помощью которого управляется самовоспроизведение образовавшихся структур. Общая теория процессов самоорганизации в открытых, сильно неравновесных системах развивается в нелинейной термодинамике на основе установленного Гленсдорфом и Пригожиным универсального критерия эволюции. Этот критерий является обобщением принципа минимального производства энтропии на нелинейные процессы и состоит в следующем [1].

Полное производство энтропии в системе равно:

$$P = \int_V \sigma dV = \int_V \sum_i I_i X_i dV . \quad (1)$$

Представим производную dP/dt в виде двух слагаемых:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \int_V \sum_i I_i \frac{\partial X_i}{\partial t} dV + \int_V \sum_i \frac{\partial I_i}{\partial t} X_i dV = \frac{\partial_X P}{\partial t} + \frac{\partial_I P}{\partial t} , \quad (2)$$

первое из которых определяет скорость изменения производства энтропии, обусловленную изменением термодинамических сил, а второе обусловлено изменением потоков. В области

линейных процессов оба слагаемых одинаковы и производная $\partial P/\partial t$ выражает принцип минимума производства энтропии. В самом деле, используя линейный закон (1) и соотношения Онсагера (2), имеем

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_x}{\partial t} &= \int_V \sum_i I_i \frac{\partial X_i}{\partial t} dV = \int_V \sum_{i,k} L_{ik} X_k \frac{\partial X_i}{\partial t} dV = \int_V \sum_{i,k} X_k \frac{\partial}{\partial t} (L_{ki} X_i) dV = \\ &= \int_V \sum_k \frac{\partial I_k}{\partial t} X_k dV = \frac{\partial I P}{\partial t} = \frac{1}{2} \frac{\partial P}{\partial t} \leq 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Неравенство (3) следует из принципа о минимальном производстве энтропии. В нелинейной области величина скорости производства энтропии $\partial P/\partial t$ не имеет какого-либо общего свойства. Однако, как показали Гленсдорф и Пригожин, величина $d_x P/\partial t$ удовлетворяет неравенству общего характера:

$$\frac{\partial_x P}{\partial t} \leq 0, \quad (4)$$

которое является обобщением принципа минимального производства энтропии. Это неравенство не зависит ни от каких предположений о характере связей между потоками и силами в условиях локального равновесия. Ввиду большой общности, соотношение (4) называется универсальным критерием эволюции Гленсдорфа-Пригожина. Согласно этому критерию, в любой неравновесной системе с фиксированными граничными условиями процессы идут так, что скорость изменения производства энтропии, обусловленная изменением термодинамических сил, уменьшается. Знак равенства в (4) относится к стационарному состоянию.

Заметим, что универсальный критерий эволюции Гленсдорфа-Пригожина является косвенным следствием второго начала термодинамики для неравновесных процессов. Критерий эволюции (4) определяет только часть прироста энтропии, связанную с изменением термодинамических сил, поэтому он не позволяет ввести такую функцию состояния – термодинамический потенциал, который бы в стационарном состоянии имел экстремум, подобно энтропии, энергии Гельмгольца, энергии Гиббса при малых (спонтанных) отклонениях от равновесия. Однако при некоторых условиях форма $d_x P$ приобретает свойства полного дифференциала, что позволяет и в сильно неравновесной области ввести локальные потенциалы с экстремальными свойствами.

Упорядоченные структуры, возникающие согласно критерию (4) при необратимых процессах в открытых системах вдали от равновесия в нелинейной области, когда параметры систем превышают определенные критические значения, Пригожин назвал диссипативными структурами. Существуют пространственные, временные и пространственно-временные диссипативные структуры.

Первый закон термодинамики – закон сохранения энергии: ни одна материальная система не может развиваться или функционировать, не потребляя энергии ΔE , которая расходуется на совершение работы A_T , на изменение внутренней энергии системы ΔU и на рассеивание тепла в окружающую среду Q_{oc} :

$$\Delta E = \Delta U + A_T + Q_{oc}.$$

Работа A_T может совершаться в различных формах (механическая, электрическая и т.д.) и расходуется на изменение состояния систем, например, упорядочение структуры и т.д.

Второй закон термодинамики – закон возрастания энтропии: реальные изолированные макроскопические системы стремятся самопроизвольно перейти из менее вероятного состояния в более вероятное или из менее упорядоченного в более упорядоченное [2].

Самопроизвольные процессы в системах идут в направлении уменьшения свободной энергии: $F = U - QS$, где Q – тепло; S – энтропия.

В конечном счете, устойчивым является такое состояние системы, в котором свободная энергия F имеет наименьшее возможное при данных условиях значение.



Синергетика представляет собой системный подход при изучении динамических систем с иерархическим устройством. По-видимому, наиболее общим механизмом диссипации энергии в динамических системах являются различного вида релаксационные явления. Эти процессы можно описать только с помощью нелинейных уравнений, что объясняет запаздывание и нелинейность подсистем ЭЭО, а следовательно, ее хаотизацию.

Если в равновесном состоянии подсистемы ЭЭО могут вести себя самостоятельно, то переход в неравновесное состояние устанавливает когерентность, т.е. согласованность их действия, а самоорганизация, захватившая низший уровень системы, приводит к качественным изменениям функционирования всей системы. В результате самоорганизации деформационных процессов в системе обработки, система приобретает и новые количественные параметры – устойчивое состояние с определенным уровнем, совершая неравновесный фазовый переход с формированием пространственно-временной диссипативной структуры, математическим образом которой в фазовом пространстве является предельный цикл.

В системах с диссипацией в процессе эволюции фазовый объем сокращается. Если диссипативная система имеет много степеней свободы, то у нее может быть много зон притяжения в фазовом пространстве. Если они составлены из нескольких устойчивых циклов, то система стремится к одной из точек устойчивого равновесия. Поэтому устойчивое состояние возможно лишь в определенном интервале времени работы оборудования и обусловлено уменьшением числа степеней свободы в фазовом пространстве. Это означает, что в период перестройки системы ряд степеней свободы уже отмирает, а новые еще не развились. С позиций теории синергетики каждая стационарная диссипативная структура представляет собой одно из устойчивых состояний системы и характеризуется своей областью притяжения в фазовом пространстве.

В связи с изложенным возникает острая проблема изыскания новых подходов к оценке динамики хаотических колебаний и устойчивости. Проведенные исследования позволили предложить ряд динамических характеристик оценки устойчивости в процессе эволюции процесса ЭЭО – это скорость изменения энтропии в системе ЭЭО, время релаксации неустойчивости в системе ЭЭО, фрактальная размерность акустического сигнала, информационная энтропия, критерии Ляпунова. Таким образом, самоорганизующиеся технологические системы – это замкнутые нелинейные динамические системы, способные обеспечить устойчивость и оптимальное функционирование за счет согласованного перераспределения энергии и ее диссипации в подсистемах в процессе обработки.

Выявленные механизмы самоорганизации в технологической системе позволяют целенаправленно управлять устойчивостью процесса обработки, износом инструмента, обеспечивая повышение точности изготовления деталей в процессе обработки. В этой связи система диагностики устойчивости процесса обработки конструктивно может выполняться как составная часть системы ЧПУ типа CNC. Все вычислительные процедуры обеспечиваются процессором ЧПУ либо специализированным сопроцессором в соответствии с алгоритмом функционирования. Применение интеллектуальных контролеров в совокупности с персональным компьютером позволит существенно повысить эффективность систем ЧПУ [3].

Продолжительность единичного воздействия при ЭЭО составляет $10^{-4} \dots 10^{-3}$ с, но длительность активной фазы не превышает $10^{-6} \dots 10^{-5}$ с. Период температурной релаксации зависит от объема рассматриваемой зоны, и для поверхностного слоя, воспринимающего энергию электрического разряда, толщиной 10 мкм составляет порядка 10^{-4} с. Следовательно, время активного взаимодействия материала с электрическим разрядом в среднем на 1-2 по-

рядка меньше периода формирования активного диссипативного теплового стока, функционирующего за счет теплопроводности.

Образование поверхностей при ЭЭО происходит в условиях воздействия электрического разряда, приводящего к эрозии электродных материалов, развитию анодного массового потока, выделению тепла на поверхности электродов и поглощению энергии за счет формирования измененной структуры. Энергию разряда можно представить с позиций первого начала термодинамики:

$$W = A + Q + \Delta U, \quad (5)$$

где W – энергия разряда; A – работа, затраченная на разрушение электрода; Q – тепло; ΔU – приращение внутренней энергии.

В случае образования одного структурного состояния величина поглощенной внутренней энергии остается постоянной, т.е. $\Delta U = \text{const}$, тогда уравнение (5) можно представить в дифференциальной форме:

$$\frac{dW}{dt} = \frac{dA}{dt} + T \frac{dS}{dt} + S \frac{dT}{dt}, \quad (6)$$

где S – энтропия; T – температура; t – время.

В таких системах энтропия возрастает со скоростью:

$$\sigma[S] = \frac{dS}{dt} + \sigma_e[S], \quad (7)$$

где σ – производство энтропии; σ_e – поток энтропии, возникающий вследствие взаимодействия с внешней средой.

После подстановки получим

$$\frac{dW}{dt} = \frac{dA}{dt} + T(\sigma[S] - \sigma_e[S]) + S \frac{dT}{dt}. \quad (8)$$

Плотность подводимой мощности и время активного воздействия таковы, что не позволяют сформироваться тепловым каналам отвода энергии, поэтому образующаяся несбалансированная часть расходуется в виде работы эрозионного разрушения. Уравнение энергетического баланса процесса взаимодействия материала с единичным разрядом примет вид:

$$W_a = Q + \Delta H_{\phi c} + A_{\text{э}}, \quad (9)$$

где W_a – энергия единичного разряда в активный момент времени; $\Delta H_{\phi c}$ – энтальпия полиморфных превращений; $A_{\text{э}}$ – работа эрозионного разрушения. В дифференциальном виде уравнение (5) имеет вид:

$$\frac{dW}{dt} = \frac{dA_{\text{э}}}{dt} + T(\sigma[S] - \sigma_e[S]) + S \frac{dT}{dt} + \sum_{i=1}^k \left(\frac{\partial \mu_i}{\partial t} \right) \cdot V_i. \quad (10)$$

Структурные превращения в материале относятся к инерционным процессам. Интенсивность этих процессов достигает своего максимума после прекращения активного действия искрового разряда, следовательно, доля энергетических затрат на структурные превращения незначительна. Уравнение (9) в момент действия активного времени воздействия искрового разряда может быть представлено в виде

$$\frac{dW}{dt} \approx \frac{dA_{\text{э}}}{dt} + T(\sigma[S] - \sigma_e[S]) \quad (11)$$

или

$$\frac{dW}{dt} \approx a_{\text{э}} \frac{dM}{dt} + T(\sigma[S] - \sigma_e[S]), \quad (12)$$



где a_3 – удельная работа, затраченная на эрозионное разрушение; $\frac{dM}{dt}$ – скорость эрозионного разрушения.

Синергетика изучает процессы самоорганизации систем, а нелинейная динамика исследует сценарии возникновения порядка из хаоса. ЭЭО является синергетическим процессом. Процесс ЭЭО обладает свойством саморегулирования благодаря наличию внутренней обратной связи между производством и эвакуацией частиц двумя совершенно различными по своей природе физическими процессами, хотя процесс эвакуации и порожден процессом эрозии и они имеют общий источник энергии – электрический разряд. Поскольку первый процесс не может быть непрерывным без второго и выходные характеристики метода определяются совокупностью обоих физических процессов, они должны одновременно удовлетворять иногда совпадающим, иногда различным требованиям [4].

Такие процессы, которые включают в себя как детерминированные, так и стохастические составляющие, крайне трудно анализировать с позиции стандартных математических методов – анализа Фурье, статистического анализа и т.п. Поэтому наиболее приемлемым подходом к исследованию процессов ЭЭО является применение методов нелинейной динамики. Нелинейная динамика позволяет разделить истинно случайные процессы и процессы со сложной, но вполне предсказуемой динамикой, которые внешне выглядят случайными. Использование алгоритмов нелинейной динамики для исследования процессов ЭЭО позволило выявить закономерности влияния параметров обработки на ее эффективность и качество получаемой поверхности. Проведенные исследования показали, что основным критерием, определяющим производительность и качество обработки, является устойчивость рабочих процессов ЭЭО в различных масштабах времени. С позиций термодинамики открытых систем колебание параметров D , λ и S_u означает периодический переход системы в новое состояние с образованием диссипативных структур. При этом важным моментом оказывается существование определенного соотношения между производством и обменом энтропии с внешней средой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кабалдин, Ю. Г. Управление динамическими процессами в технологических системах механообработки на основе искусственного интеллекта / Ю. Г. Кабалдин, С. В. Биленко, С. В. Серый. – Комсомольск-на-Амуре : ГОУВПО «КнАГТУ», 2003. – 201 с.
2. Кабалдин, Ю. Г. Повышение устойчивости процесса электроэрозионной обработки и качества обработанной поверхности на основе подходов искусственного интеллекта / Ю. Г. Кабалдин, М. Ю. Сариллов, С. В. Биленко. – Комсомольск-на-Амуре : ГОУВПО «КнАГТУ», 2007. – 191 с.
3. Малинецкий, Г. Г. Современные проблемы нелинейной динамики / Г. Г. Малинецкий, А. Б. Потапов. – М. : Эдиториал УРСС, 2000. – 336 с.
4. Пригожин, И. Р. Термодинамическая теория структур, устойчивости и флуктуации / И. Р. Пригожин, Л. Гленсдорф. – М. : Мир. 1973. – 280 с.