

УДК 51.001:536.75+621.002:658.512

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ

*Академик НАН Беларуси, доктор техн. наук, профессор П.И. ЯЩЕРИЦЫН,
доктор техн. наук, профессор М.Л. ХЕЙФЕЦ,
С.В. КУХТА, С.В. ПАЛЬВИНСКИЙ*

Предложено при автоматизированном проектировании физико-химических методов обработки конструкционных материалов использовать доминирование свойств отношений технологических решений. Приведена математическая модель и критерии, описывающие доминирование контролируемых параметров технологической системы. Рассмотрено проектирование плазменно-механической, электромагнитной и электронно-лучевой поверхностной упрочняющей обработки конструкционных материалов.

Перспективным направлением является создание новых физико-химических 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-химических 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 изделия.

В результате под методом обработки понимается совокупность энергетических и информационных процессов, направленных на изменение формы, размеров, качества поверхности и физико-химических свойств конструкционного материала [2, 3].

Алгоритм выбора технологических решений

Для формализации условий целенаправленного создания новых методов обработки каждая совокупность одноименных компонентов системы 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.

Анализ свойств отношений. 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) нетранзитивности (из $x \ll y$ и $y \ll z$ не следует $x \ll z$).

Синергетический подход. При отсутствии симметричности и транзитивности для определения доминирования параметра целесообразно применить синергетическую концепцию, использующую понятие моды непрерывной случайной величины, под которой понимают такое значение параметра, при котором плотность его распределения имеет максимум [7].

Распределения случайных величин, на фоне которых проявляются моды, описываются законами [8]:

- 1) равномерным $f(x) = 1 / (\mu_1 - \mu_0)$, при $\mu_0 \leq x \leq \mu_1$;
- 2) экспоненциальным $f(x) = (1 / \mu) \exp(-x / \mu)$, при $\mu > 0, x > 0$;
- 3) нормальным $f(x) = (1 / (\sigma \sqrt{2\pi})) \exp(-(x - \mu)^2 / (2\sigma^2))$, при $\sigma > 0, -\infty < \mu < \infty, -\infty < x < \infty$ или др.,

где μ – математическое ожидание; μ_0 и μ_1 – ограничения; σ^2 – дисперсия случайных величин x .

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

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

где λ_p^2 – критерий Пирсона; k – число степеней свободы, т.е. количество групп в изучаемом ряду, рассчитанных (μ, σ и др.) и используемых при вычислении теоретического распределения статистических характеристик.

Статистический анализ характеристик производственной системы в рамках широкой номенклатуры применяемых технологий, оборудования и средств оснащения позволяет ограничить номенклатуру рассматриваемых объектов и процессов. При выборе количества ограничений для объектов и процессов целесообразно рассмотреть взаимосвязимость 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.

Самоорганизующиеся системы. В самоорганизующихся системах можно управлять гибкостью и надежностью, изменяя число подсистем [9]. 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} . Эти оценки основаны на анализе линейной зависимости, на самом же деле обратная связь, присущая производственным системам, приводит к еще более значительному подавлению рассеяния характеристик [9, 10].

Таким образом, при автоматизированном проектировании принятие ТР по совершенствованию производственных систем целесообразно проводить на основе синергетического анализа технологических процессов и объектов [10, 11].

Термодинамическая модель комбинированной обработки

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 [9].

Уравнения физико-химических процессов. В результате сокращения числа степеней свободы получаются уравнения, группирующиеся в несколько универсальных классов, вида [7, 9]:

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

где \vec{U} – контролируемый параметр; τ – текущее время; G – нелинейная функция \vec{U} и возможно градиента \vec{U} ; D – коэффициент, описывающий диффузию, когда его значение действительно, или описывающий пространство 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 [10, 11].

Фазовые переходы. В соответствии с синергетической концепцией фазовые переходы происходят в результате самоорганизации [9], процесс которой описывается тремя степенями свободы, отвечающими параметру порядка (P), сопряженному (C) ему полю и управляющему (Y) параметру [12].

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, 9]. Поэтому, кроме процесса релаксации, к равновесному состоянию в течение времени τ^P при участии двух степеней свободы могут реализовываться режимы передачи – «наследования» или автоколебаний в системе, а при участии трех – возможен переход в хаотическое состояние [10, 12].

В результате состояние технологической системы характеризуется несколькими режимами [12, 13]:

1) релаксационным – реализуется, когда время релаксации параметра порядка намного превосходит времена релаксации остальных степеней свободы ($\tau_P^P \gg \tau_Y^P$ и $\tau_P^P \gg \tau_C^P$);

2) запоминания – определяется «замороженным» беспорядком при переходе из неупорядоченного состояния и реализуется, когда время релаксации параметра порядка окажется намного меньше остальных времен ($\tau_P^P \ll \tau_Y^P$ и $\tau_P^P \ll \tau_C^P$);

3) автоколебательным – требует соизмеримости характерных времен изменения параметра порядка и управляющего параметра или сопряженного поля ($\tau_P^P \gtrsim \tau_Y^P$ или $\tau_P^P \gtrsim \tau_C^P$);

4) стохастическим – характеризуется странным аттрактором и возможен при соизмеримости времен всех трех степеней свободы ($\tau_Y^P \gtrsim \tau_P^P \gtrsim \tau_C^P$).

Таким образом, доминирование ТР может быть определено критериями процессов переноса энергии и вещества при фазовых переходах в неравновесных технологических системах.

Критерии физико-химических процессов

При обосновании выбора ТР и синтезе комбинированных физико-химических методов необходимо учитывать стабильность формирования параметров качества обработки и рассматривать механизмы управления устойчивостью технологического процесса путем применения обратных связей [10, 14]. Поскольку условия, обеспечивающие самоорганизацию поверхностных явлений и стабилизацию формирования параметров качества физико-химической обработки, являются следствием избыточности рассматриваемой технологической системы по структурному составу [15], то целесообразно в качестве целевой функции вместо конкретных значений совокупности критериев выбора использовать критерии самоорганизации процессов [16].

Производство энтропии. Взаимосвязанные процессы движения и обмена материальными и информационными потоками в технологической системе описываются энтропией [17, 18]:

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

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

Уравнение баланса локальной плотности энтропии $\rho\varepsilon$ по времени τ .

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

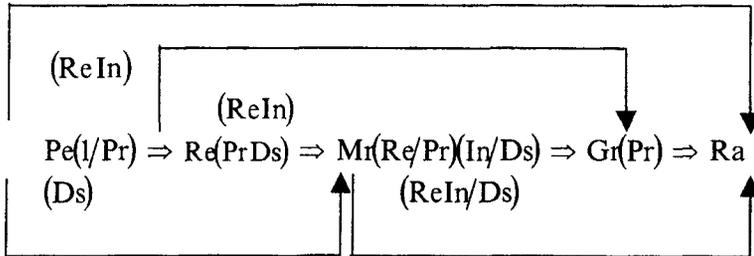
в котором \vec{F}_ε – плотность потока энтропии; \vec{V} – скорость потока; $\sigma = d\varepsilon / d\tau$ – производство энтропии:

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

где \vec{F}_q – плотность теплового потока; T – абсолютная температура; k – число компонентов; \vec{F}_{di} – плотность диффузионного потока i -того компонента; W_i – химический потенциал i -того компонента; \vec{F}_{mi} – сила масс, действующая на i -тый компонент; \vec{P}_g – диссипативная часть тензора давления, описывающая вязкие силы; R_o – число протекающих реакций; ν_{ir} – стехиометрический коэффициент i -того компонента r -той реакции; ω_r – скорость r -той реакции.

Производство энтропии в соответствии с фундаментальной теоремой Пригожина – Гленсдорфа, определяющей условия перехода к эволюции, стационарному и устойчивому состоянию [19], дает возможность рассматривать режимы изменений состояний технологической системы по критериям, описывающим фазовые переходы.

Критерии термомеханических процессов. Критерии переноса устанавливают последовательности структурообразования в обрабатываемом материале и на формируемой поверхности при постепенном (\Rightarrow) и резком (\rightarrow) возрастании мощности воздействий потоками энергии [10, 11, 20]:



в которых

$Pe = v t / \omega$ – критерий Пекле, определяющий отношение количества теплоты, отводимого конвекцией и путем теплопроводности;

$Pr = \nu / \omega$ – критерий Прандтля, характеризующий способность теплоты распространяться в данной среде;

$Re = v t / \nu$ – 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;

$Mг = \lambda \nabla T t^2 / (\rho \omega \nu)$ – критерий Марангони, определяющий возникновение регулярных поверхностных течений вследствие температурной зависимости коэффициента поверхностного натяжения;

$Gr = \beta g \nabla T t^3 / \nu^2$ – 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; ω – коэффициент температуропроводности; ν – коэффициент кинематической вязкости; β – коэффициент объемного расширения; g – ускорение свободного падения; T – абсолютная температура; λ – коэффициент терموкапиллярности; ρ – плотность обрабатываемого материала.

Критерии электромагнитных процессов. Критерии, характеризующие электромагнитные потоки, при физико-химической обработке взаимосвязаны с последовательностями критериев переноса, поэтому они оказывают существенное влияние на последовательности изменения поверхностных явлений и помогают управлять формированием свойств обрабатываемого материала [11, 21, 22]:

$$Sm(Em/Se) \Rightarrow Si \quad \dashrightarrow \quad Mг(Ek) \Rightarrow E(Tk/Ek) \Rightarrow Ra,$$

в которых

$Sm = IB^2 / (\nu^2 \rho t)$ – критерий магнитного взаимодействия;

$Em = \nu E_t / (HB)$ – отношение скорости потока к его теплосодержанию и напряженности электрического поля к его магнитной индукции;

$Se = E_t^2 t^2 / (IR)$ – критерий напряженности электрического поля;

$Si = I^2 R / (\nu \rho H t^3)$ – энергетический критерий;

$Ek = \varepsilon^* \gamma^* \nabla T / \lambda$ – отношение термоэлектрической и капиллярной сил;

$E = \varepsilon^* \gamma^* \nabla T^2 t^2 / (\rho \omega \nu)$ – термоэлектрический критерий;

$Tk = \rho \beta^* g t^2 / \lambda$ – отношение подъемной силы плавучести к капиллярной силе,

где I – сила тока; B – магнитная индукция; E_t – напряженность электрического поля; H^l – энтальпия потока; R – электросопротивление; ε^* – диэлектрическая проницаемость; γ^* – коэффициент термоэлектродвижущей силы.

Совокупность критериев тепломассопереноса и критериев, характеризующих электромагнитные потоки, описывает взаимодействие гидродинамических и электродинамических подсистем в открытой

технологической системе физико-химической обработки. Такое взаимодействие осуществляется как на уровне подсистем путем наложения полей и воздействия потоков на технологическую среду, так и на уровне элементов системы, посредством изменения их кинематических, динамических и объемных характеристик [10, 11, 23].

Проектирование физико-химических методов обработки

Использование последовательностей критериев переноса, анализ режимов перехода и состояний технологической системы многократно сокращает объем экспериментальных исследований при проектировании комбинированных методов физико-химической обработки материалов [10, 11, 22].

Рассмотрим проектирование плазменно-механического (рис. 1), электромагнитного (рис. 2) и электронно-лучевого (рис. 3) методов формирования поверхности материалов, используя предложенные последовательности критериев, анализируя режимы обработки и состояние технологической системы.

Плазменно-механическая обработка. Для определения режимов устойчивого формирования параметров качества обработки в процессе ротационного резания с предварительным плазменным нагревом (см. рис. 1) согласно критериям Pe , Pr , Re , описывающим изменения проводимости и вязкости среды при увеличении интенсивности воздействий, рассматривались малые отклонения составляющих сил P и моментов M , формообразования поверхности (рис. 4).

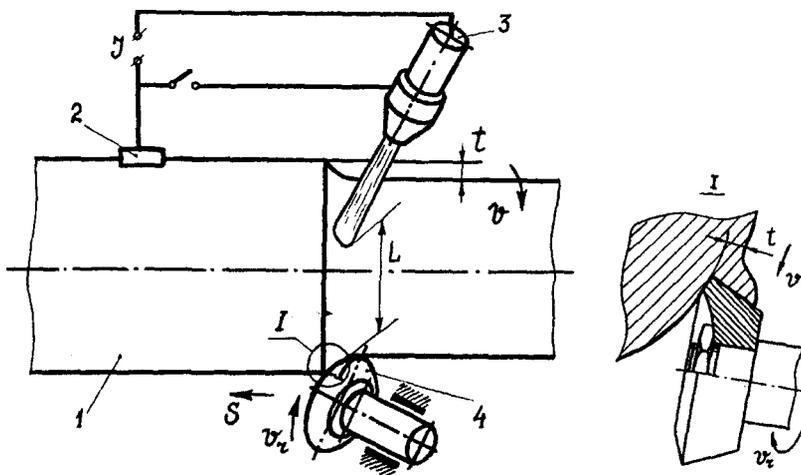


Рис. 1. Обработка ротационным резцом с предварительным плазменным нагревом: 1 – обрабатываемая деталь; 2 – скользящий контакт; 3 – плазматрон; 4 – ротационный резец; v – скорость главного движения; v_r – скорость дополнительного движения; S – скорость подачи; t – глубина резания; L – расстояние от пятна нагрева до инструмента; I – сила тока плазменной дуги

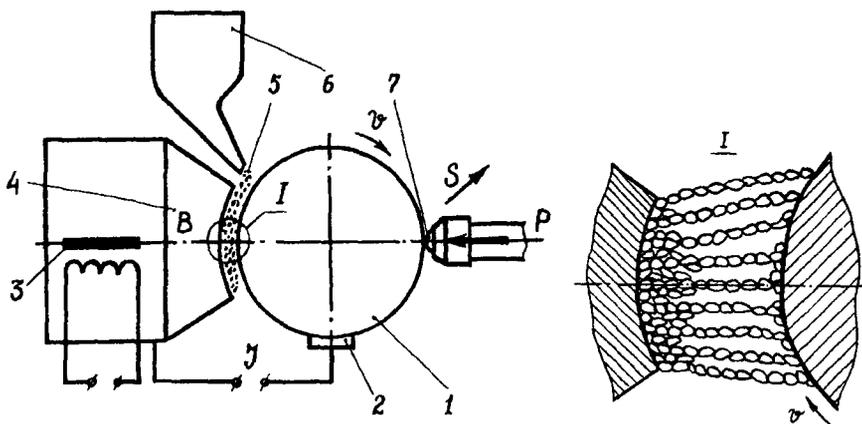


Рис. 2. Электромагнитная наплавка с поверхностным пластическим деформированием: 1 – обрабатываемая деталь; 2 – скользящий контакт; 3 – электромагнит; 4 – полюсный наконечник; 5 – ферромагнитный порошок; 6 – дозирующее устройство; 7 – шариковый обкатчик; v – скорость главного движения; S – скорость подачи; P – усилие деформирования; B – магнитная индукция; I – сила тока электродуговых разрядов

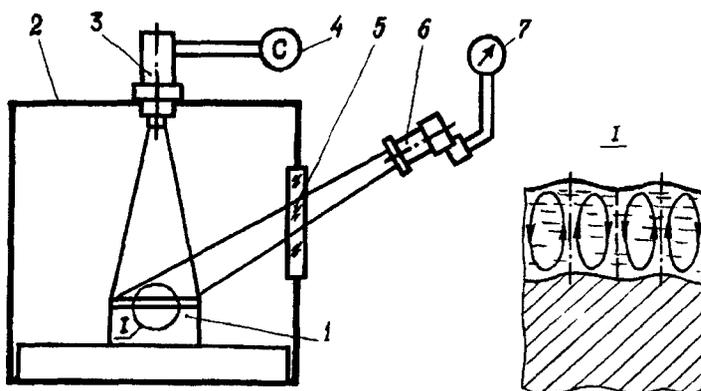


Рис. 3. Электронно-лучевой нагрев поверхности:

1 – обрабатываемая деталь; 2 – вакуумная камера; 3 – электронная пушка с системами фокусировки и развертки; 4 – секундомер; 5 – иллюминатор; 6 – пирометр; 7 – милливольтметр

Результаты исследований показали, что возможны два типа равновесных состояний: неустойчивый узел (НУ) и неустойчивое седло (НС) [10, 24]. При режиме НУ динамические параметры рабочей зоны технологической системы удаляются от положения равновесия. Система совершает аperiodические самовозбуждающиеся движения, которые переходят в устойчивые автоколебания предельного цикла (ПЦ). В режиме НС при малых отклонениях динамические параметры системы удаляются от положения равновесия в заданных направлениях. Всегда существуют два новых стабильных состояния, к которым приближается система (рис. 4, а). Эти состояния могут слиться, расширив диапазоны своего существования, при использовании дополнительных перемещений – вращений режущей кромки ротационного инструмента (рис. 4, б).

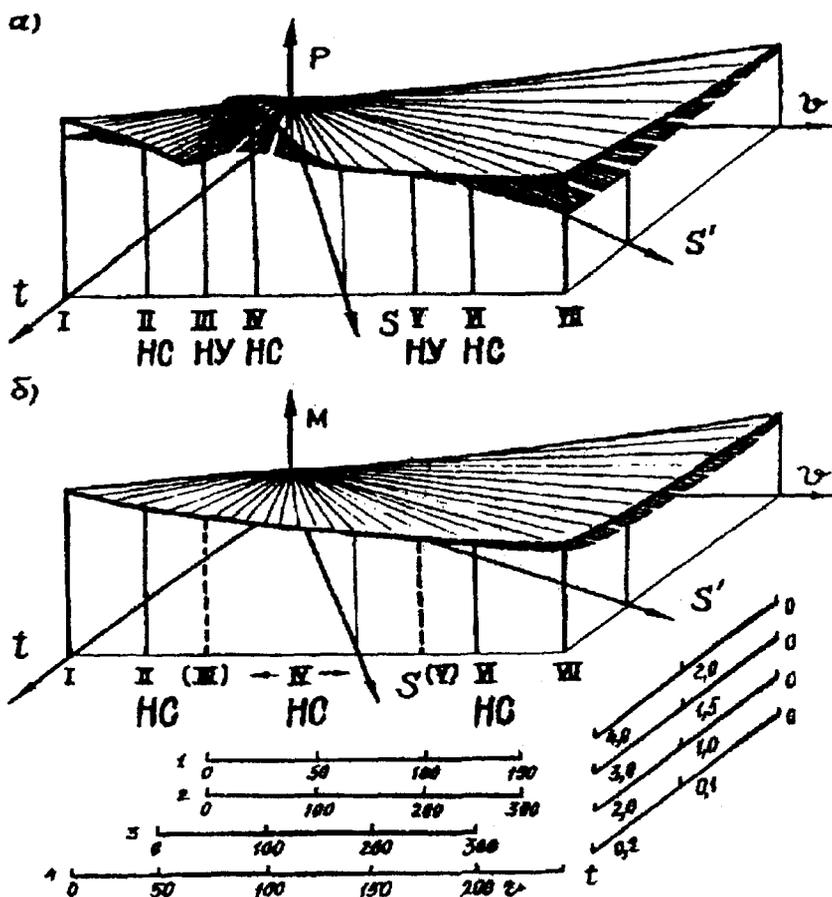


Рис. 4. Отклонения составляющих сил P (а) и моментов M (б) формообразования поверхности

на стадиях структурообразования (I – VII) в зависимости от скорости v (м/мин) и глубины t (мм) резания:

1 – титановых сплавов; 2 – конструкционных; 3 – хромоникелевых сталей; 4 – хромоникелевых порошковых покрытий

Анализ образования структур поверхностного слоя в процессе плазменно-механической обработки при исследовании влияния устойчивости динамических характеристик P и M на формирование параметров качества поверхности показал возможность использования режимов НУ при черновой обработке и позволил рекомендовать режимы НС для чистовой обработки [10, 24].

Электромагнитная обработка. Оптимальные режимы электромагнитной наплавки с поверхностным пластическим деформированием (см. рис. 2) определялись с использованием критериев тепломассопереноса Pe , Pr , Re и электромагнитных потоков Sm , Se , Si .

Вязкость и проводимость технологической среды, формируемой в рабочей зоне под воздействием электромагнитного поля частицами ферромагнитного порошка, описывается соотношениями ротационной и трансляционной составляющих напряженного состояния ферропорошковой среды [10, 25].

Электромагнитное поле согласно критерию магнитного взаимодействия Sm изменяет напряженное состояние технологической среды через произведение BI , управляя магнитными потоками и создавая, в соответствии с критерием напряженности электрического поля Se , через отношение E/I необходимую разность потенциалов между частицами порошка, заготовкой и полусным наконечником. В результате при электромагнитной наплавке обеспечивается тепловое действие тока I^2R , описываемое энергетическим критерием Si .

В процессе поверхностного пластического деформирования нагретой при наплавке поверхности определены те же типы равновесных состояний НУ и НС, характеризующиеся не только вращением, но и прецессией деформирующего элемента – шарика. В соответствии с режимом формируется траектория пятна контакта по обрабатываемой поверхности: петлеобразная или волнообразная кривая [10, 25].

В результате, управление процессом формирования поверхностного слоя осуществляется воздействиями потоков энергии и вещества через потоки электромагнитного поля, степени свободы частиц технологической среды и инструментов.

Электронно-лучевая обработка. Стабильность формирования параметров качества при электронно-лучевом нагреве поверхности (см. рис. 3) определялась по критериям тепломассопереноса Mr , Gr , Ra и по термоэлектрическому критерию E . При этом значения параметров качества обработки (рис. 5, а) сравнивались с количеством формируемых структур, характеризуемым относительной площадью модифицированной поверхности (рис. 5, б) [10, 11, 26].

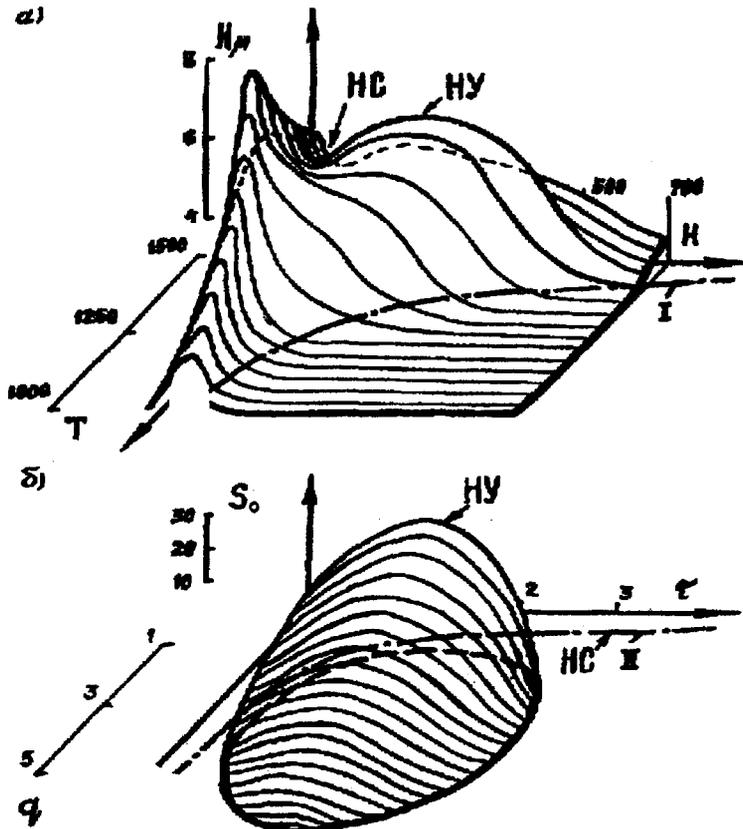


Рис. 5. Распределение микротвердости H_{μ} (ГПа) по глубине H (мм) поверхностного слоя титанового сплава с хромоникелевым покрытием (а) при изменении температуры T (К) и относительная площадь поверхности S (%) с модифицированной структурой в зависимости от удельной мощности q (кВт/см²) и продолжительности τ (с) электронно-лучевого нагрева (б), видимая граница модифицированного слоя (I) и граница плавления (II)

Образование ячеистой структуры на модифицируемой поверхности титанового однофазного псевдо- α -сплава происходит путем формирования вихревых диссипативных структур в жидком состоянии (см. рис. 3). Вначале зарождаются, а затем отодвигаются на периферию узкие ячейки, формируемые термокапиллярной силой, описываемой критерием Марангони Mg . С ростом интенсивности электронно-лучевого воздействия в центре зоны нагрева естественная конвекция, характеризуемая критерием Грасгофа Gg , размывает вихревые диссипативные структуры. Широкие тороидальные вихри, создаваемые силой плавучести, описываемой критерием Рэлея Ra , при электронно-лучевом воздействии наблюдаются только при глубоком оплавлении поверхности [23, 26]. Термозлектрический критерий E характеризует влияние ионизированного жидкого металла на вихревые течения в ванне расплава [11, 23].

Исследование соотношения площади S_0 поверхности с ячеистой структурой и общей площади оплавленного участка в зависимости от удельной мощности q и продолжительности нагрева τ показало (см. рис. 5, б), что наибольшая площадь с регулярной структурой $S_0 = 40\%$ образуется в узком диапазоне интенсивности нагрева [10, 26].

Рассмотренные типы равновесных состояний технологической системы НУ и НС наблюдаются также при электронно-лучевой обработке. Так, образование ячеистой структуры на максимальной площади характеризуется режимом НУ, трансформирующимся в предельный цикл. Ограничением цикла являются процессы перехода обрабатываемого материала из твердого в жидкое состояние. Формирование поверхности раздела – границы плавления – описывается режимом НС. Движения от поверхности раздела в противоположных направлениях, путем теплопроводности и конвекции тепловых потоков, стабилизируют состояние различных фаз системы [10, 11].

Зависимости изменения микротвердости структур (см. рис. 5, а), характеризуемые физико-химическими превращениями в поверхностном слое титановых сплавов с покрытиями, выглядят аналогично зависимостям формирования ячеистых структур (см. рис. 5, б). Химические реакции, растворение в твердом состоянии элементов покрытия, образование фаз эвтектического состава, оплавление поверхности покрытия с образованием регулярной структуры, подплавление основы с образованием переходной зоны, формирование диффузионной зоны при электронно-лучевых воздействиях [10, 13, 26] приводят к изменению микротвердости по глубине поверхностного слоя титанового сплава с хромоникелевым покрытием (см. рис. 5, а).

Следовательно, для управления прочностью сцепления покрытия с основой и улучшения физико-химических параметров обрабатываемых поверхностей необходимо ограничивать диапазон интенсивности электронно-лучевого воздействия в соответствии с химическим составом и толщиной покрытия.

Заключение

Математическое моделирование и алгоритмизация принятия решений, путем определения вида уравнений, установления критериев подобия и анализа равновесных состояний системы [27, 28] при проектировании высокоэффективных технологий обработки поверхностей концентрированными потоками энергии [29, 30] позволили сделать следующие выводы:

1. Системный анализ при автоматизированном проектировании методов обработки, помимо эквивалентности и предпочтения, должен базироваться на доминировании свойств отношений технологических решений.
2. Согласно синергетической концепции доминирование контролируемых параметров приводит к ограничению числа состояний технологической системы, которые определяются отношениями времен релаксации параметров системы.
3. Переходы технологической системы из одного состояния в другое описываются критериями переноса, характеризующими определяющие параметры комбинированных методов физико-химической обработки материалов.
4. Механизмы формирования физико-химических параметров качества обработки определяются режимами равновесных состояний технологической системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. О самоорганизации в технологическо-эксплуатационных процессах при комбинированных методах обработки материалов / П.И. Ящерицын, Л.М. Кожуро, И.А. Сенчило, М.Л. Хейфец // Доклады АН Беларуси. – 1995. – Т. 39. – № 1. – С. 112 – 116.
2. Подураев В.Н. Технология физико-химических методов обработки. – М.: Машиностроение, 1985. – 264 с.
3. Рыжов Э.В., Аверченков В.И. Оптимизация технологических процессов механической обработки. – Киев: Навукова думка, 1989. – 192 с.

4. Голоденко Б.А., Смоленцев В.П. Организация целенаправленного формирования новых методов комбинированной обработки // Вестник машиностроения. – 1994. – № 4. – С. 25 – 28.
5. Автоматизация проектирования технологических процессов и средств оснащения / Под ред. А.Г. Раковича. – Мн.: ИТК НАНБ, 1997. – 276 с.
6. Коршунов Ю.М. Математические основы кибернетики. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 496 с.
7. Эбелинг В. Образование структур при необратимых процессах. – М.: Мир, 1979. – 279 с.
8. Сигорский В.П. Математический аппарат инженера. – Киев: Техника, 1977. – 768 с.
9. Хакен Г. Синергетика. – М.: Мир, 1980. – 404 с.
10. Хейфец М.Л., Кожуро Л.М., Мрочек Ж.А. Процессы самоорганизации при формировании поверхностей. – Гомель: ИММС НАНБ, 1999. – 276 с.
11. Синергетические аспекты физико-химических методов обработки / А.И. Гордиенко, М.Л. Хейфец, Б.П. Чемисов и др. – Мн.: ФТИ НАНБ; Новополоцк: ПГУ, 2000. – 172 с.
12. Олемской А.И., Коплык И.В. Теория пространственно-временной эволюции неравновесной термодинамической системы // Успехи физических наук. – 1995. – Т. 165. – № 10. – С. 1105 – 1144.
13. Технологическо-эксплуатационные барьеры в поверхностном слое при высокоинтенсивной обработке металлов / П.И. Ящерицын, А.А. Шипко, М.Л. Хейфец, Л.М. Кожуро // Доклады АН Беларуси. – 1997. – Т. 41. – № 5. – С. 110 – 113.
14. Проектирование технологических комплексов высокоэффективной обработки изделий на основе многофакторной оптимизации / П.И. Ящерицын, Л.М. Кожуро, М.Л. Хейфец, Б.П. Чемисов // Доклады АН Беларуси. – 1997. – Т. 41. – № 3. – С. 121 – 127.
15. Артоболевский И.И., Ильинский Д.Я. Основы синтеза машин автоматического действия. – М.: Наука, 1983. – 280 с.
16. Совершенствование производственных систем на основе создания условий для самоорганизации технологических процессов и объектов / П.И. Ящерицын, А.А. Шипко, М.Л. Хейфец, Н.Н. Попок // Доклады АН Беларуси. – 1996. – Т. 40. – № 1. – С. 118 – 121.
17. Дружинин В.В., Конторов Д.С. Проблемы системологии: проблемы теории сложных систем. – М.: Сов. радио, 1976. – 296 с.
18. Статистический анализ конструктивных элементов и технологических параметров деталей машин / М.Л. Хейфец, В.С. Точило, В.И. Семенов и др. – Новополоцк: ПГУ, 2001. – 112 с.
19. Гленсдорф П., Пригожин И. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуации. – М.: Мир, 1973. – 280 с.
20. Анализ свойств отношений технологических решений при проектировании комбинированных методов обработки материалов / П.И. Ящерицын, В.И. Аверченков, М.Л. Хейфец, С.В. Кухта // Доклады НАН Беларуси. – 2001. – Т. 45. – № 4. – С. 106 – 109.
21. Технологические основы управления качеством машин / А.С. Васильев, А.М. Дальский, М.Л. Хейфец и др. – Мн.: ФТИ НАНБ; Новополоцк: ПГУ, 2002. – 216 с.
22. Прямое выращивание деталей машин послойным синтезом с управляемым формированием свойств материала потоками энергии / П.И. Ящерицын, Н.Ф. Лугаков, М.Л. Хейфец, С.В. Кухта // Известия НАН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2000. – № 3. – С. 40 – 43.
23. Эйдельман Е.Д. Возбуждение электрической неустойчивости нагреванием // Успехи физических наук. – 1995. – Т. 165. – № 11. – С. 1279 – 1294.
24. Обработка износостойких покрытий / Под ред. Ж.А. Мрочека. – Мн.: ДизайнПРО, 1997. – 208 с.
25. Акулович Л.М. Термомеханическое упрочнение деталей в электромагнитном поле. – Новополоцк: ПГУ, 1999. – 240 с.
26. Шипко А.А., Поболь И.Л., Урбан И.Г. Упрочнение сталей и сплавов с использованием электронно-лучевого нагрева. – Мн.: Наука и техника, 1995. – 280 с.
27. Тарасик В.П. Математическое моделирование технических систем. – Мн.: ДизайнПРО, 1997. – 640 с.
28. Хейфец М.Л. Математическое моделирование технологических процессов. – Новополоцк: ПГУ, 1999. – 104 с.
29. Технологические основы высокоэффективных методов обработки деталей / П.И. Ящерицын, М.Л. Хейфец, Б.П. Чемисов и др. – Новополоцк: ПГУ, 1996. – 136 с.
30. Интеллектуальное производство: состояние и перспективы развития / Под ред. М.Л. Хейфеца и Б.П. Чемисова. – Новополоцк: ПГУ, 2002. – 268 с.