

УДК 621:681.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ СОВМЕСТНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ПРИ КОМБИНИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЙ И ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

д-р техн. наук, проф. М.Л. ХЕЙФЕЦ, канд. техн. наук В.А. ГАЙКО
(Президиум НАН Беларуси, Минск);
канд. техн. наук, доц. Е.З. ЗЕВЕЛЕВА
(Полоцкий государственный университет);
А.М. ПЫНЬКИН
(ГНПО «Центр», Минск)

Показано, что использование критериев переноса для анализа процессов образования структур и фаз многократно сокращает объем экспериментальных исследований технологии формирования поверхностного слоя при комбинированных методах электрофизической обработки. Предложено при управлении источниками энергии использовать соотношения, пропорциональные критериям тепломассопереноса. Показано, что анализ обобщенных схем процессов электрофизической обработки позволяет выделить основные принципы организации обратной связи в открытой технологической системе. Выделены прямые и обратные связи для управления электромагнитными и термомеханическими воздействиями: положительные в случае формирования рельефа поверхности, отрицательные при изменении свойств материала, определяющие производительность обработки. Показано, что обеспечение условий самоорганизации процессов формирования поверхностного слоя и организация обратных связей в открытых технологических системах при совместных воздействиях позволяют посредством стабилизации электрофизических и термомеханических процессов управлять эффективностью и качеством обработки.

Введение. На современном этапе научно-технического прогресса требования, предъявляемые к прочности, твердости, вязкости, износостойкости поверхности, столь высоки, что традиционные методы обработки в ряде случаев не позволяют достаточно эффективно получить необходимые параметры качества поверхностных слоев изделий. В связи с этим на машиностроительных предприятиях все чаще применяются совмещенные и комбинированные методы электрофизической обработки, использующие плазменные, электродуговые, ионные, электроннолучевые, лазерные и другие источники энергии [1].

Изучение потоков энергии с различной плотностью мощности показало возможность реализации в производственных условиях разнообразных комбинированных методов электрофизической обработки, незначительное число которых, если практически и не воспроизводимо, то в то же время их существование возможно в качестве побочных явлений и эффектов при других электрофизических методах формирования поверхностей [2].

Анализ эффективности обработки показал целесообразность применения методов, совмещающих как электрофизические, так и термомеханические воздействия [1, 2].

Математическая модель совместных воздействий. Процесс комбинированной электрофизической и термомеханической обработки сопровождается многочисленными взаимодействиями различных потоков энергии в рабочей зоне технологической системы.

Рассмотрим критерии состояния рабочей зоны технологической системы при электрофизической обработке на основе анализа уравнения баланса локальной плотности энтропии $\rho\epsilon$ по времени τ [3]:

$$\partial(\rho\epsilon)/\partial\tau + \nabla(\rho\epsilon \cdot \vec{V}) + \nabla\vec{F}_\epsilon = \sigma, \quad (1)$$

где \vec{F}_ϵ – плотность потока энтропии; \vec{V} – скорость потока; ∇ – оператор Лапласа; σ – производство энтропии ($\sigma = \partial\epsilon/\partial\tau$).

Исследование состояний рабочей зоны, изучение самоорганизации совместных электрофизических и термомеханических воздействий при комбинированных методах обработки [1] позволяют рассмотреть модель процессов формирования изделий:

$$\partial\rho/\partial\tau + \nabla(\rho\vec{V}) = 0; \quad (2)$$

$$\partial(\rho\vec{V})/\partial\tau + \nabla(\rho\vec{V} \cdot \vec{V}) + \nabla\vec{P} = \rho \sum_{i=1}^K \vec{F}_{mi}; \quad (3)$$

$$\partial(\rho e)/\partial\tau + \nabla(\rho e \cdot \vec{V}) + \nabla \vec{F}_q = \sum_{i=1}^K \vec{F}_{mi} \vec{F}_d - \vec{P} \cdot \nabla \vec{V}; \quad (4)$$

$$\partial C_i / \partial\tau + \nabla(C_i \cdot \vec{V}) + \nabla \vec{F}_d = \sum_{r=1}^{R_0} \nu_{i,r} \cdot \omega_r, \quad (5)$$

в которой

$$\rho = \sum_{i=1}^K M_i C_i; \quad (6)$$

$$\vec{F}_e = (\vec{F}_q - \sum_{i=1}^K \vec{F}_d W_i) / T; \quad (7)$$

$$\sigma = \vec{F}_q [\nabla(1/T)] - \sum_{j=1}^K \vec{F}_d [\nabla(W_j/T) - (1/T) \vec{F}_{mj}] - (1/T) \vec{P}_g \cdot \nabla \vec{V} + (1/T) \sum_{i=1}^K W_i \cdot \sum_{r=1}^{R_0} \nu_{ir} \cdot \omega_r, \quad (8)$$

где ∇ – оператор Лапласа; ρ – массовая плотность обрабатываемого материала; $\rho \vec{V}$ – плотность импульса; ρe – плотность энергии; \vec{P} – тензор давления; K – число компонентов; \vec{F}_{mi} – сила масс, действующая на i -й компонент; \vec{F}_q – плотность теплового потока; \vec{F}_d – плотность диффузионного потока i -го компонента; R_0 – число протекающих реакций; $\nu_{i,r}$ – стехиометрический коэффициент i -го компонента r -й реакции; ω_r – скорость r -й реакции; M_i – молекулярная масса i -го компонента; C_i – концентрация i -го компонента; W_i – химический потенциал i -го компонента; T – абсолютная температура; \vec{P}_g – диссипативная часть тензора давления, описывающая вязкие силы.

Решение уравнений (1)...(5) при неизменных характеристиках обрабатываемого материала, отсутствии дополнительных источников энергии, постоянных ненулевых скоростях и других составляющих режима обработки имеет вид:

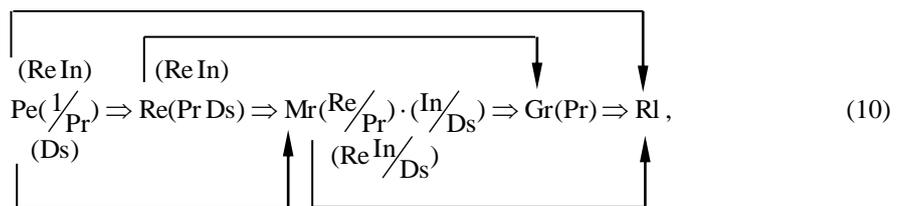
$$\vec{V} = \nabla \times \vec{V}^*, \quad (9)$$

так как $\nabla \cdot (\nabla \times \vec{V}^*) = 0$ или $div(rot \vec{V}^*) = 0$,

где \vec{V}^* – составляющая вращения в потоке, движущемся со скоростью \vec{V} .

Это свидетельствует о появлении составляющих вращения в потоке технологической среды, т.е. структурных изменений среды и формировании в ней диссипативных структур, что описывается критериями переноса.

Критерии теплопереноса [4, 5] устанавливают последовательность структурообразования в обрабатываемом материале и на формируемой поверхности при увеличении мощности воздействий [1]:



в которой

$Pe = Vt/\omega$ – критерий Пекле;

$Pr = \nu/\omega$ – критерий Прандтля;

$Re = Vt/\nu$ – критерий Рейнольдса;

$In = \beta g \nabla T t^2 / V^2$ – отношение подъемной силы плавучести к инерционной силе;

$Ds = \sigma_k \nabla T t / (V\rho/\nu)$ – отношение сил капиллярности и вязкости;

$Mr = \sigma_k \nabla T t^2 / (\rho \omega \nu)$ – критерий Марангони;

$Gr = \beta g \nabla T t^4 / \nu^2$ – критерий Грасгофа;

$Rl = \beta g \nabla T t^4 / (\omega v)$ – критерий Рэлея,

где t – характерный размер; ω – коэффициент температуропроводности; V – скорость; ν – коэффициент кинематической вязкости; β – коэффициент объемного расширения; g – ускорение свободного падения; T – абсолютная температура; σ_k – коэффициент термокапиллярности; ρ – плотность технологической среды.

Критерии, характеризующие потоки энергии, при электрофизической обработке оказывают существенное влияние на последовательность поверхностных явлений и помогают управлять формированием свойств обрабатываемого материала [2]:

$$Sm(Em/Se) \Rightarrow Si \text{ и } Mr(Ek) \Rightarrow E(Tk/Ek) \Rightarrow Rl, \quad (11)$$

в которых

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

$Em = VE_1 / (H' B)$ – отношение скорости потока к его теплосодержанию и напряженности электрического поля к его магнитной индукции;

$Se = E_1 t^2 / (IR)$ – критерий напряженности электрического поля;

$Si = I^2 R / (\nu \rho H' t^3)$ – энергетический критерий;

$Ek = \varepsilon \gamma^2 \nabla T / \sigma_k$ – отношение термоэлектрической и капиллярной сил;

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

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

где I – сила тока; B – магнитная индукция; H' – энтальпия потока; R – электросопротивление; ε – диэлектрическая проницаемость; γ – коэффициент термоэлектродвижущей силы; E_1 – напряженность электрического поля.

Использование критериев переноса для анализа процессов образования структур и фаз многократно сокращает объем экспериментальных исследований технологии формирования поверхностного слоя при комбинированных методах электрофизической обработки.

Анализ обратных связей в технологической системе. При изучении термомеханических явлений в процессах электрофизической обработки целесообразно использовать критерии Пекле (Pe) и Рейнольдса (Re) [2].

Критерий Пекле характеризует отношение количества теплоты, отводимого конвекцией и путем теплопроводности, и определяет, является ли данный источник теплоты быстро движущимся [4].

Критерий Рейнольдса описывает переход ламинарного движения обрабатываемого материала в турбулентное течение, Re представляется произведением $Pe \cdot Pr$, в котором критерий Прандтля (Pr) характеризует способность теплоты распространяться в данной среде [5].

Для описания процессов тепломассопереноса при использовании концентрированных потоков энергии применяются критерии, характеризующие поверхностные и пространственные движения потоков вещества [4, 5].

Поверхностные течения вследствие проявления термокапиллярных явлений, порожденных зависимостью поверхностного натяжения от температуры, описываются критерием Марангони (Mr).

Критерий Грасгофа (Gr) характеризует ротацию потока, учитывающую влияние естественной конвекции, при свободном движении потоков жидкости внутри формируемого слоя.

Образование в объеме расплавленного слоя силой плавучести пространственно-периодической системы тороидальных вихрей представляется критерием Рэлея (Rl).

При оптимизации электрофизических процессов по параметрам формирующихся структур для управления источниками энергии используются критерии, характеризующие электромагнитные потоки [2].

Выводимый из уравнения энергии критерий Si показывает соотношение между джоулевой теплотой и кинетической энергией потока:

$$Si = \frac{V}{H'} \cdot \frac{R/t}{\rho V^2} \cdot \left(\frac{I}{t} \right)^2. \quad (12)$$

Критерий магнитного взаимодействия Sm необходим при обобщении электрических характеристик источников энергии с магнитным управлением электрической дугой.

Критерий Sm получается из уравнения импульсов ($P\tau = \rho V$) и раскрывает соотношение между электромагнитной и инерционной силами:

$$Sm = \frac{B}{\rho V^2} \cdot \frac{I}{t} = \frac{B}{\tau(PV)} \cdot \frac{I}{t}. \quad (13)$$

Критерий напряженности электрического поля Se вытекает из закона Ома и описывает проводимость рабочей зоны:

$$Se = \frac{E_1}{R/t} \cdot \frac{t}{I}. \quad (14)$$

Соотношение критериев магнитного взаимодействия Sm (13) и напряженности электрического поля Se (14) дает выражение:

$$\frac{Sm}{Se} = \frac{B}{E_1} \cdot \frac{R/t}{\rho V^2} \cdot \left(\frac{I}{t}\right)^2, \quad (15)$$

которое аналогично энергетическому критерию Si (12) связывает отношения удельного электросопротивления рабочего зазора R/t к кинетической энергии потока ρV^2 и силы тока I к длине разрядного промежутка t . Отличие формул (12) и (15) в том, что первая определяет отношение скорости потока V к его теплосодержанию H' , а вторая – отношение магнитной индукции B к напряженности электрического поля E_1 . Напряженность поля E_1 для источников тока (генераторов электрических импульсов) характеризуется напряжением U холостого хода, а для источников напряжения (трансформаторов) – силой разрядного тока I .

Процессы формирования поверхностного слоя в технологической системе электрофизической обработки описываются модифицированными критериями Рейнольдса Re^* , Прандтля Pr^* и критерием Пекле Pe [1, 6]:

$$Re^* = \frac{Pe}{Pr^*} = \frac{V_s t}{\omega^* Pr^*} = \frac{V_s t}{v^*} = \frac{V_s t}{(\sigma_P / \sigma_M)(V/S)} = \left(\frac{\sigma_M}{\sigma_P}\right) \cdot \left(\frac{V_s S t}{V}\right), \quad (16)$$

в которых $\vec{V}_s = \vec{V} + \vec{S}$ – результирующая скорость движений формирования поверхности, главного \vec{V} и подачи \vec{S} ; t – толщина наносимого и деформируемого слоя с учетом изменения его плотности ρ ; ω^* и v^* – соответственно обобщенная проводимость и вязкость технологической среды; σ_P – трансляционная составляющая напряженного состояния технологической среды и сформированного покрытия в направлении силы деформирования P ; σ_M – ротационная составляющая напряженного состояния в направлении вращения на плоскости, образованной \vec{P} и \vec{V} .

Соотношение составляющих напряженного состояния среды σ_M / σ_P на микроуровне и скоростей дополнительного и главного движения элементов технологической системы S/V на макроуровне описывает вязкость технологической среды $1/v^*$, называемую ротационной [1, 6]:

$$\mu^* = \frac{1}{v^*} = \left(\frac{\sigma_M}{\sigma_P}\right) \left(\frac{S}{V}\right). \quad (17)$$

Ротационная вязкость $\mu^* = -\tau^*/rotv^*$ характеризует переход объемной вязкости среды $\zeta^* = -\sigma^*/divv^*$ в динамическую $\eta = -\tau_g / gradv$ при интенсификации технологических воздействий, используя добавочные касательные τ^* и нормальные σ^* напряжения, при сжатии и растяжении среды наряду с нормальным напряжением давления σ_g и динамическим касательным напряжением $\tau_g = -\eta\sigma_g$ [6], а v^* описывает турбулентные составляющие вращения в потоке среды, движущимся со скоростью V .

При образовании термодинамически неустойчивых структур целесообразно критерием Рейнольдса Re^* (16), описывающим турбулентность поверхностных течений и потоков обрабатываемого материала, определять волнистость и шероховатость формирующегося рельефа поверхности R_a [1, 2].

Поэтому толщина формируемого слоя, пропорциональная увеличению или снижению его массы, с учетом сплошности или пористости покрытия, в результате которых изменяется относительное упрочнение $H_\varepsilon = \Delta H/H$, описывается выражением $Q/(1-H_\varepsilon)$, в котором Q – коэффициент пропорциональности.

Соотношение параметров напряженного состояния σ_p/σ_M в (16) и (17), пропорциональных факторам, определяющим перемещение и вращение частиц порошка и вещества деформируемого материала, согласно критериям Sm (13), Se (14) и Sm/Se (15), представляется отношениями:

- B/τ (13) – для магнитодинамических;
- t/I (14) – для термодинамических;
- P/I (13) – для термомеханических;
- B/E_1 (15) – для электромагнитных воздействий.

Отношение B/E_1 может быть представлено как B/U при использовании в качестве источника электрической дуги генераторов импульсов; B/I – при использовании трансформаторов.

В результате при управлении источниками энергии целесообразно использовать соотношения, пропорциональные критериям тепломассопереноса, для оптимизации геометрических характеристик рельефа поверхности

$$R_a \sim \frac{V_s [Q/(1-H_\varepsilon)]}{(B/I) \cdot (V/S)} = \frac{V_s SIQ}{VB(1-H_\varepsilon)} = \frac{\Pi}{(1-H_\varepsilon)} \quad (18)$$

и для оптимизации физико-технических параметров относительного упрочнения материала поверхностного слоя:

$$H_\varepsilon \sim 1 - \frac{V_s SIQ}{VBR} = 1 - \frac{\Pi}{R_a} \quad (19)$$

Соотношения (18) и (19) показывают положительную обратную связь рельефа R_a и отрицательную обратную связь упрочнения H_ε с производительностью обработки $\Pi = V_s QSI/VB$, а также характеризуют кинематику оборудования (S/v) и мощности источника энергии (I/B) или (U/B), если учитывается напряжение.

Анализ обобщенных схем процессов электрофизической обработки позволяет выделить основные принципы организации обратной связи в открытой технологической системе.

В случае, когда в первую очередь необходимо сформировать поверхность (18), а затем ее упрочнить (19), как, например, при деформировании и резании, в технологической системе при термомеханических воздействиях создается положительная обратная связь. Избыточные степени свободы инструмента и технологической среды, подавляя рассеяние потоков энергии и вещества в формоизменяемом припуске, создают упрочняющие структуры в поверхностном слое и повышают производительность обработки.

В том случае, когда сначала требуется упрочнить (19), а в завершение сформировать рельеф поверхности (18), как, например, при нанесении покрытий, в технологической системе при электрофизических воздействиях организуется отрицательная обратная связь. Дополнительные воздействия источниками энергии и веществами, формируя упрочняющие структуры в поверхностном слое, не допускают развития неустойчивости процесса при образовании рельефа поверхности и при стабилизации не позволяют поднять производительность обработки.

Организация обратных связей в технологическом комплексе электрофизической обработки через избыточные степени свободы инструментов, частиц наносимого материала и удаляемого слоя, а также посредством дополнительных воздействий потоками поля и источниками энергии, позволяет управлять устойчивостью процессов формирования поверхностного слоя путем использования их самоорганизации.

Когда физико-химические механизмы формирования поверхностного слоя неизвестны, предлагается описывать процессы не системой уравнений баланса (1)...(5), а законами распределения случайных величин.

Судить о степени соответствия статистических данных выбранному закону распределения позволяет отношение Романовского [7, 8]:

$$R_0 = (\lambda_p^2 - k_p) / \sqrt{2k_p},$$

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

Статистический анализ параметров качества методов комбинированной обработки позволяет выделить наиболее значимые технологические факторы и выявить их взаимосвязи. Формирование технологических регламентов изучаемых методов обработки только из узких диапазонов режимов, ограниченных условиями самоорганизации совместных электрофизических и термомеханических воздействий, создает условия для стабилизации параметров качества поверхностного слоя.

Заключение. Математическая модель совместных электромагнитных и термомеханических воздействий базируется на критериях тепломассопереноса и электрофизического взаимодействия, определяет основные технологические факторы и связывает геометрические (R_d) и физико-технические (H_ϵ) параметры качества с производительностью (Π) обработки.

Обеспечение условий самоорганизации процессов формирования поверхностного слоя согласно критериям и организация обратных связей в открытых технологических системах при совместных воздействиях позволяют посредством стабилизации электрофизических и термомеханических процессов управлять эффективностью и качеством обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хейфец, М.Л. Самоорганизация процессов при высокоэффективных методах обработки деталей / М.Л. Хейфец. – Новополоцк: ПГУ, 1997. – 268 с.
2. Акулович, Л.М. Термомеханическое упрочнение деталей в электромагнитном поле / Л.М. Акулович. – Новополоцк: ПГУ, 1999. – 240 с.
3. Эбелинг, В. Образование структур при необратимых процессах: введение в теорию диссипативных структур / В. Эбелинг. – М.: Мир, 1979. – 279 с.
4. Телегин, А.С. Тепломассоперенос / А.С. Телегин, В.С. Швыдкий, Ю.Г. Ярошенко. – М.: Metallurgy, 1995. – 400 с.
5. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент / под ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 560 с.
6. Обработка износостойких покрытий: учеб. пособие / Л.М. Кожуро [и др.]; под общ. ред. Ж.А. Мрочка. – Минск: Дизайн ПРО, 1997. – 208 с.
7. Пасхвер, И.С. Закон больших чисел и статистические закономерности / И.С. Пасхвер. – М.: Статистика, 1974. – 210 с.
8. Программно-информационное обеспечение автоматизации подготовки производства / В.И. Арбузов [и др.]. – Минск: БГПА, 1998. – 77 с.

Поступила 26.07.2010

MODELLING OF JOINT TECHNOLOGICAL INFLUENCES AT THE COMBINED ELECTROPHYSICAL AND THERMOMECHANICAL PROCESSING

M. KHEIFETZ, V. GAJKO, E. ZEVELEVA, A. PYNKIN

It is shown, that use of criteria of carrying over for the analysis of processes of formation of structures and phases repeatedly reduces volume of experimental researches of technology of formation of a blanket at the combined methods of electrophysical processing. It is offered at management of energy sources to use the parities proportional to criteria of carrying over of heat and weight. It is shown, that the analysis of the generalised schemes of processes of electrophysical processing allows to allocate main principles of the organisation of a feedback in open technological system. Straight lines and feedback for management of electromagnetic and thermomechanical influences are allocated: positive in case of formation of a relief of a surface, negative at change of properties of the material, processings defining productivity. It is shown, that maintenance of conditions of self-organising of processes of formation of a blanket and the organisation of feedback in open technological systems at joint influences allow to operate by means of stabilisation of electrophysical and thermomechanical processes efficiency and quality of processing.